

**VAASAN YLIOPISTO**

**TEKNILLINEN TIEDEKUNTA**

**SÄHKÖTEKNIikka**

Toni Hiekka

**PIENJÄNNITTEINEN SÄHKÖNJAKELUKOJEISTO TASAJÄNNITEKUOR-  
MILLE**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 22.05.2012

Työn valvoja

Professori Kimmo Kauhaniemi

Työn ohjaaja

Insinööri Antti Stig

Työn tarkastaja

Professori Timo Vekara

## ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty Vaasan yliopiston teknillisessä tiedekunnassa osana sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkintoa. Aiheen tarjosi ja työn mahdollisti ABB Oy:n Low Voltage Systems Vaasassa. Työ toteutettiin Low Voltage Systems:n tiloissa, laitteilla ja ohjelmistolisensseillä.

Työn valvojana toimi professori Kimmo Kauhaniemi ja tarkastajana professori Timo Vekara. Työn ohjaajana toimi insinööri Antti Stig. Suurena apuna olivat myös insinöörit Ari Rosing, Raimo Kytömäki, Juuso Lilja ja asentaja Kauko Hietikko. Kiitän kaikkia työhön osallistuneita asiantuntevasta avusta.

Viimeisenä, mutta ei vähäisimpänä, haluan kiittää tytärtäni Oonaa, Eliisa-siskoä, vanhempiani ja lähimpiä ystäviäni kaikesta saamastani tuesta opiskelujeni aikana.

SISÄLLYSLUETTELO	SIVU
ALKULAUSE	2
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	5
TIIVISTELMÄ	7
ABSTRACT	8
1 JOHDANTO	9
2 PIENJÄNNITESÄHKÖNJAKELU	11
2.1 Tasa- ja vaihtojännitteen erot sähkönsiirrossa	11
2.2 Tasajännitteisen sähkönsiirron hyödyt	13
2.3 Tasajännitteisen sähkönsiirron haasteet	14
2.4 Pientasajännitekojeiston käyttökohteita	16
3 TASAJÄNNITEVERKON KOMPONENTIT	20
3.1 Ilma- ja kompaktikatkaisija	20
3.2 Vaihtosuuntaaja	23
3.3 Tasasuuntaaja	24
3.4 Muuntaja	27
3.5 Kondensaattori ja suodatin	28
3.6 Tasajännitemuunnin	29
3.7 Diodi	31
3.8 Bipolaari- ja unipolaari siirtoverkko	32
4 TASAJÄNNITTEISEN SÄHKÖNJAKELUKOJEISTON RAKENNE JA KOMPONENTIT	34
4.1 Tasajännitteisen sähkönjakelukojeiston rakenne	34
4.1.1 Kotelointiluokka	35
4.1.2 Tasajännitekojeiston maadoitus	38
4.2 Tasajännitteisen sähkönjakelukojeiston komponentit	41
4.2.1 Syöttökentän ilmakatkaisija	42
4.2.2 Kompaktikatkaisija	50
4.2.3 Moottorilähtö	54
4.2.4 Smissline-johdonsuojakatkaisija	55
4.2.5 Diodi	57
4.2.6 Kiskoston rakenne ja kuormitus	59
4.2.7 UPS-järjestelmän akuston rakenne	63
5 TASAJÄNNITTEISEN SÄHKÖNJAKELUKOJEISTON SUUNNITTELU	66
5.1 MDB-yksikkö	66
5.2 PDU-yksikkö	73
5.3 Kojeiston kiskostot	78
5.4 Kustannusten vaikutus suunnittelussa	79
5.5 PDU-yksiköiden mitoitus eri virtaportaille	80

5.6 Akusto	81
6 YHTEENVETO	86
LÄHDELUETTELO	90

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

## Symbolit

$\alpha$	Siniaaltojen välinen kulmaero
$f$	Taajuus (Hz)
$I_{cu}$	Oikosulkuvirran katkaisukyky (A)
$I_{cw}$	Oikosulkuvirta (A)
$I_u$	Syöttövirta (A)
$P$	Pätöteho (W)
$U_{AC}$	Vaihtojännite (V)
$U_{DC}$	Tasajännite (V)
$U_e$	Syöttöjännite (V)
$U_{main}$	Pääjännite (V)
$U_{pika}$	Akun pikalatausjännite (V)
$U_{purku}$	Akulta purkautuva jännite (V)
$U_{rms}$	Jännitteen tehollisarvo (V)

## Lyhenteet

AC	Vaihtovirta (Alternative Current)
CEI	Italialainen standardointiorganisaatio (Comitato Elettrotecnico Italiano)
DC	Tasavirta (Direct Current)
EN	Euroopan Unionin standardi (European Norm)

EEC	Euroopan talousyhteisö (European Economic Community)
EU	Euroopan Unioni
G	Maasulkusuojaus säädettävällä viiveellä (Ilmakatkaisijan suojarleen ominaisuus)
I	Oikosulun pikalaukaisu (Ilmakatkaisijan suojarleen ominaisuus)
IGBT	Eristehilatransistori (Insulated Gate Bipolar Transistor)
IEC	Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio (International Electrotechnical Commission)
IP-luokka	Kotelointiluokka (Internal Protection)
IT	Information Technology
K	Kuormanohjaus (Ilmakatkaisijan suojarleen ominaisuus)
L	Ylikuormitussuojaus (Ilmakatkaisijan suojarleen ominaisuus)
OT	Lämpötilan ylityksen tai alituksen suojaus (Ilmakatkaisijan suojarleen ominaisuus)
OV	Ylijännite (Ilmakatkaisijan suojarleen ominaisuus)
PDU	Sähkönjakeluyksikkö (Power Distribution Unit)
RP	Aktiivinen takateho (Ilmakatkaisijan suojarleen ominaisuus)
S	Selektiivinen oikosulkusuojaus (Ilmakatkaisijan suojarleen ominaisuus)
SFS	Suomen standardisoimisliitto
THD	Harmoninen särö (Total Harmonic Distortion)
UPS	Keskeytymätön sähkönsyöttö (Uninterruptible Power Supply)
UV	Alijännite (Ilmakatkaisijan suojarleen ominaisuus)

---

**VAASAN YLIOPISTO****Teknillinen tiedekunta**

<b>Tekijä:</b>	Toni Hiekka
<b>Diplomityön nimi:</b>	Pienjännitteinen sähkönjakelukojeisto tasajännitekuormille
<b>Valvoja:</b>	Professori Kimmo Kauhaniemi
<b>Ohjaaja:</b>	Insinööri Antti Stig
<b>Tarkastaja:</b>	Professori Timo Vekara
<b>Tutkinto:</b>	Diplomi-insinööri
<b>Yksikkö:</b>	Sähkö- ja energiatekniikan yksikkö
<b>Koulutusohjelma:</b>	Sähkö- ja energiatekniikan koulutusohjelma
<b>Suunta:</b>	Sähkötekniikka
<b>Opintojen aloitusvuosi:</b>	2004
<b>Diplomityön valmistumisvuosi:</b>	2012

---

**Sivumäärä: 93****TIIVISTELMÄ**

Työn tarkoituksena oli suunnitella keskeytymätön sähkönjakelu kriittisille tasajännitekuormille ja rakentaa suunnitellusta tasajännitteisestä sähkönjakelukojeistosta prototyyppi. Työssä täytyi määrittää tasajännitekäyttöön sopivat komponentit ja jännite- ja virtarajat, jotka soveltuvat sekä tasajännitteisten kuormien tarpeisiin että vikatilanteiden aikana kuormia syöttäville akustoille. Tasajännitteen käyttäytyminen katkaisijoissa ja kiskostoissa poikkeaa vaihtojännitteen käyttäytymisestä, joten tasajännitteelle määritettävät komponentit vaativat oman mitoituksen.

Työn aluksi käydään läpi yleisesti tasajännitteen ominaisuuksia, tasajännitteen käyttömahdollisuuksia ja tasajännitteen jakeluun tarvittavia komponentteja. Tarkemmin työssä perehdytään tasajännitteisen jakelukojeiston komponentteihin ja sähkönjakelukojeiston suunnitteluperiaatteisiin. Osana työtä määritetään myös tasajännitteisen sähkönjakelukojeiston tärkeimmät käyttökohteet. Teoriaosuudessa aineistona on käytetty suurimaksi osaksi kirjallisuutta, mutta tasajännitteisen sähkönjakelukojeiston kehittämisessä suureksi avuksi on ollut myös alan ammattilaisten konkreettiset kokemukset kojeistojen suunnittelusta ja toteutuksesta.

Tasajännitekojeiston tärkeimpiin käyttökohteisiin lukeutuvat muun muassa ATK-keskukset. ATK-keskukset sisältävät useita tasajännitettä käyttäviä palvelimia. Tässä työssä suunnitellun tasajännitteisen sähkönjakelukojeiston avulla saadaan turvattua keskeytymätön sähkönsyöttö kaikille kriittisille tasajännitekuormille ja vähennetään huomattavasti tehohäviöistä syntyviä kustannuksia. Tasajännitteistä sähkönjakelukojeistoa voidaan käyttää myös erilaisissa teollisuussovelluksissa, laivoissa ja tasajännitteisissä kiinteistöissä. Työn tärkeimpänä tuloksena on tasajännitteisen sähkönjakelukeskuksen prototyyppi, joka toteutetaan tämän työn suunnittelutuloksien perusteella.

---

**AVAINSANAT:** Tasajännite, sähkönjakelukojeisto, tasajännitekuormat.

---

**UNIVERSITY OF VAASA**
**Faculty of technology**

<b>Author:</b>	Toni Hiekka
<b>Topic of the Thesis:</b>	Low Voltage DC distribution switchgear for DC-loads
<b>Supervisor:</b>	Professor Kimmo Kauhaniemi
<b>Instructor:</b>	Engineer Antti Stig
<b>Inspector:</b>	Professor Timo Vekara
<b>Degree:</b>	Master of Science in Technology
<b>Department:</b>	Department of Electrical Engineering and Energy Technology
<b>Degree Programme:</b>	Degree Programme in Electrical and Energy Engineering
<b>Major of Subject:</b>	Electrical Engineering
<b>Year of Entering the University:</b>	2004
<b>Year of Completing the Thesis:</b>	2012

**Pages: 93****ABSTRACT**

The main purpose of this thesis was to design an uninterruptible power supply for critical direct current loads and to build a prototype of the designed switchgear. In order to come up with a right kind of design, it was important to specify all the components, and current and voltage limits, to get the distribution switchgear to work with different kind of direct current loads and with UPS-system. The behavior of direct current in circuit breakers and in busbars differs from the behavior of alternative current, and that's why the dimensioning has to be done differently.

The features, accessibilities, and components for direct current distribution are reviewed in general at the beginning of this thesis. This thesis focuses on the necessary components and the design of the direct current distribution switchgear. As a part of this thesis, the most important applications of the switchgear are determined. Literature has been used as material especially in theory part. The knowhow of the professionals has also been a great help in designing the direct current distribution switchgear.

The main use of designed direct current switchgear is going to be so called direct current Data Centers. A Data Center contains multiple server racks. All the servers are using direct current. With the use of the designed switchgear, it is possible to maintain an uninterruptible power supply for the direct current Data Center, and also the power losses can be reduced remarkably. The designed switchgear can also be used in factories and ships, when there is a need of direct current distribution. The building of a prototype of the designed direct current distribution switchgear is the main result in this master's thesis.

---

**KEYWORDS:** Direct Current, distribution switchgear, direct current load.



## 1 JOHDANTO

Nykyisin sähkönsiirto toteutetaan suurimmaksi osaksi vaihtojännitteisenä. Vaihtojännitteinen siirtotapa ei kuitenkaan välttämättä ole riittävän tehokas kattamaan kasvavaa sähkön laadun ja -siirron tarvetta. Vaihtojännitteinen siirtotapa yleistyi jo 1900-luvun alussa, eikä tasajännitteinen sähkönsiirto ollut riittävän tehokas vastaamaan vaihtojännitteen tuomiin etuihin. Tasajännitteisen sähkönsiirron heikkouksia olivat mm. kehittymätön tehoelektroniikka, jota tarvitaan tasajännitteisen sähkönsiirron toteuttamiseen. Vaihtojännitteisenä sähköä saatiin siirrettyä pidemmille matkoille kuin tasajännitteistä sähköä.

Sähkön siirrossa tavoitellaan laadukasta sähköä, pieniä häviöitä ja halutaan pitää sähkönjakelun kustannukset edullisina. Tasajännitteinen sähkönsiirto mahdollistaa nykyisin suuremmat siirtotehot ja pidemmät siirtomatkat kuin vaihtojännitteinen sähkönsiirto. Tasajännitejärjestelmällä saavutetaan myös pienemmät häviöt kuin vaihtojännitteisellä järjestelmällä. Kiinnostus tasajännitteistä siirtotapaa kohtaan on herännyt, koska nykyinen tehoelektroniikka on tarpeeksi kehittynyttä tasajännitesiirron tarpeisiin.

Myös useat elektroniikkalaitteet kuten tietokoneet ja suurin osa muusta kodinelektronikasta toimivat tasajännitteellä. Vaihtojännitteisenä siirrettävä sähkö täytyy tasasuunnata ennen kuin tasajännitteiset laitteet voivat käyttää sähköä. Tasasuuntauksista aiheutuu sekä laite- että häviökustannuksia.

Nykyisin halutaan kehittää ratkaisuja, joilla ympäristöä kuormitettaisiin mahdollisimman vähän. Sähkön tuotanto ja siirto kuormittaa ympäristöä, joten sähkönsiirrosta ja tuotannosta saataisiin myös ympäristöystävällisempää vähentämällä päästöjä ja häviöitä. Etenkin lisääntyvän kasvihuoneilmiön myötä halutaan vähentää sähkön tuotannosta ja siirrosta aiheutuvia päästöjä. Paremmilla hyötysuhteilla saadaan vähennettyä häviöitä ja pienemmillä häviöillä saadaan vähennettyä myös päästöjä. (Gab-Su, Seo & Jongbok Baek & Kyusik Choi & Hyunsu Bae & Bohyung Cho 2011: 223.)

Polttokennot ja uusiutuvista energialähteistä aurinkopaneelit voidaan kytkeä suoraan tasajänniteverkkoon, koska ne ovat valmiiksi tasajännitteisiä. Ilman erillisiä vaihtosuuntauksia säästettäisiin sekä laitekustannuksissa että häviöissä. Hajautetun energiantuotannon kannattavuutta saataisiin parannettua pienempien häviöiden avulla. Hajautettua energiantuotantoa voitaisiin hyödyntää esimerkiksi tasajännitekiinteistöissä, joiden sähkönsaanti voitaisiin turvata myös jakeluverkon vikojen aikana.

Tämän työn tarkoituksena on määrittää tasajännitteiseen sähkönsiirtoon soveltuva sähköjakelukojeisto. Tavoitteena on suunnitella eri virtaportaille soveltuva sähköjakelukojeisto, jotta saadaan monta eri vaihtoehtoa. Haasteena on määrittää eri jännitteille ja virroille sopivat komponentit ja kiskostot, koska tasajännitteisille kojeistoille on tarjolla vähemmän komponentteja kuin vaihtojännitekojeistoille. Pääkatkaisija täytyy voida valita jakelujännitteen ja virran suuruuden perusteella. Lähtökatkaisijoiden valinta suoritetaan asiakkaan tarpeiden perusteella. Lähtökatkaisijoita voidaan valita vaihto- ja tasajännitteisille kuormille tarvittavan jännitteen ja virran suuruuden mukaan.

Tavoitteena on myös rakentaa suunnitellusta kojeistosta Vaasan ABB pienjännitejärjestelmien yksikölle prototyyppi. Tasajännitekojeiston tarkoituksena on syöttää jakeluverkosta tasasuunnattu jännite kuormille katkaisijoiden ja sähköjakeluyksiköiden (PDU, Power Distribution Unit) kautta. Kojeisto toimii siis nimensä mukaisesti tasajännitteen jakelukojeistona. Jakeluverkon jännite täytyy muuntaa niin tasajännitekuormille kuin moottoreillekin sopivaksi ja tarpeen vaatiessa vaihtosuunnata kuormille ennen loppukäyttöä. Kojestoon on tarkoitus suunnitella myös keskeytymätön sähkönsyöttö eli UPS-järjestelmä (Uninterruptible Power Supply), jonka avulla turvataan kuormien sähkönsaanti myös jakeluverkossa tapahtuvien sähkökatkosten ajaksi. Tasajännitekojeistoa voidaan käyttää esimerkiksi kriittisten kuormien sähköjakelukojeistona. Kriittisiksi kuormiksi voidaan lukea muun muassa pankkien tietojenkäsittelyyn käytettävät tietokoneet ja ATK-keskukset.

## 2 PIENJÄNNITESÄHKÖNJAKELU

Suomen sähkönjakelussa nykyisin käytetty pienjännitetaso on yksivaiheisena 230 V<sub>ac</sub> (Alternative Current) ja kolmivaiheisena 400 V<sub>ac</sub>. Pienjänniteporras toteutetaan muuntamalla keskijänniteportaasta jännite 400 V<sub>ac</sub> arvoon. Sähkö siirretään yleensä asiakkaalle yksivaiheisena 230 V<sub>ac</sub>. Pienjännitedirektiivin 73/23/EEC mukaan pienjänniterajat ovat 50–1000 V<sub>ac</sub> ja 75–1500 V<sub>dc</sub> (Direct Current) (Salonen 2006: 7).

Vaihtojännitteisessä verkossa on käytössä yleensä 230 V<sub>ac</sub> jännitteenarvo. Kun sähkö siirretään tasajännitteisenä, niin tehoelektroniset laitteet kestävät suurempia jännitteitä. Nykyiset tehoelektroniset laitteet kestävät jopa 380 V<sub>dc</sub> jännitettä. Esimerkiksi tasajännitteisissä ATK-keskuksissa suurempi jännite mahdollistaisi sähkönsiirrossa pienempien virtojen käytön. (Rajagopalan, Fortenbery & Symanski 2010.)

Pientasajännitejakeluverkko sisältää yleisesti muuntajan, tasasuuntaajan, vaihtosuuntaajan, suodattimia ja kuorman, jossa sähkö käytetään. Verkon luotettavuus riippuu suurimmaksi osaksi katkaisijoiden, kondensaattoreiden, ohjaustaulujen ja varaenergianlähteiden toimivuudesta. Luotettavuuden kannalta kriittisimpiä komponentteja ovat katkaisijat ja kondensaattorit jotka sijaitsevat päävirtapiirissä. (Kaipia, Peltoniemi, Lassila, Salonen & Partanen 2009.)

### 2.1 Tasa- ja vaihtojännitteen erot sähkönsiirrossa

Tasajännite on vakioarvona pysyvä, kun taas vaihtojännitteen arvo vaihtelee negatiivisen ja positiivisen huippuarvon välillä. Vaihtojännitteen yleisimmin käytetty aallonmuoto on sinimuotoinen. Tässä kappaleessa keskitytään vertaamaan sinimuotoista vaihtojännitettä ja tasajännitettä. Vaihtojännitteen tehollisarvo vastaa jännitettä, joka saadaan kuormalle vastaavan suuruisena tasajännitteenä. Siniaaltoisen vaihtojännitteen tehollisarvo saadaan laskettua yhtälöllä

$$U_{rms} = \frac{U_p}{\sqrt{2}}, \quad (1)$$

missä  $U_{\text{rms}}$  on vaihtojännitteen tehollisarvo ja  $U_p$  on jännitteen huippuarvo.

Sinimuotoinen vaihtojännite vaihtelee positiivisen ja negatiivisen huippuarvon välillä. Sinimuotoisen vaihtojännitteen jakson pituus riippuu vaihtojännitteen taajuudesta. Yksi jakso sisältää sekä negatiivisen että positiivisen huippuarvon. Kun tarkastellaan yhtä huippua, puhutaan puolijaksosta. Kuten kuvasta nähdään, sinimuotoisella jännitteellä on useita nollakohtia. Jakson alku- ja loppupää loppuu nollakohtaan ja tämän lisäksi positiivisesta negatiiviseen arvoon siirtyessä on yksi nollakohta. Luontaisten nollakohtien vuoksi jännitteen katkaiseminen on helpompaa kuin tasajännitteellä. Tasajännitteellä ei ole luontaisia nollakohtia, koska tasajännite ei aaltoile vaihtojännitteen tavoin. Koska tasajännitteellä ei ole luontaisia nollakohtia, niin katkaisijoissa on käytettävä useampia avausvälejä, jolloin tasajännitteen katkaisusta syntyvä valokaari voisi jäähtyä ja samua.

Pienvaihtojänniteverkon suurin sallittu jännite on  $1000 V_{\text{ac}}$ , kun taas pientasajännitteellä direktiivin mukainen maksimijännite on  $1500 V_{\text{dc}}$ . Suuremman maksimijännitteen avulla saadaan siirrettyä suurempia tehoja. Tasajännitteisenä siirrettynä jännitehäviöt ovat vaihtojännitettä pienemmät, koska siirtojohtojen impedanssi vaikuttaa vaihtojännitteeseen enemmän kuin tasajännitteeseen. Vaihtojännitteeseen vaikuttava impedanssi on suurempi kuin tasajännitteellä, koska tasajännitteeseen vaikuttaa vain johdon resistanssi  $R$  ja vaihtojännitteeseen vaikuttaa resistanssin lisäksi myös reaktanssi. Tasajännitteinen sähkönsiirto mahdollistaa myös pidemmät siirtomatkat, koska tasajännitteellä on pienempi jännitteen alenema kuin vaihtojännitteellä. Kojetoissa tasajännite ja -virta voi olla suurempi kuin vaihtojännite ja -virta. Nimensä mukaisesti tasavirta kuormittaa kojeistoa ja kiskostoja tasaisemmin kuin vaihtojännite. Vaihtojännitteen pulssimainen kuormitus on kojeistoissa ja kiskostoissa kuluttavampaa.

## 2.2 Tasajännitteisen sähkönsiirron hyödyt

Aikaisemman tutkimuksen perusteella tasajänniteverkon suurimmiksi hyödyiksi saadaan (Hiekka 2011):

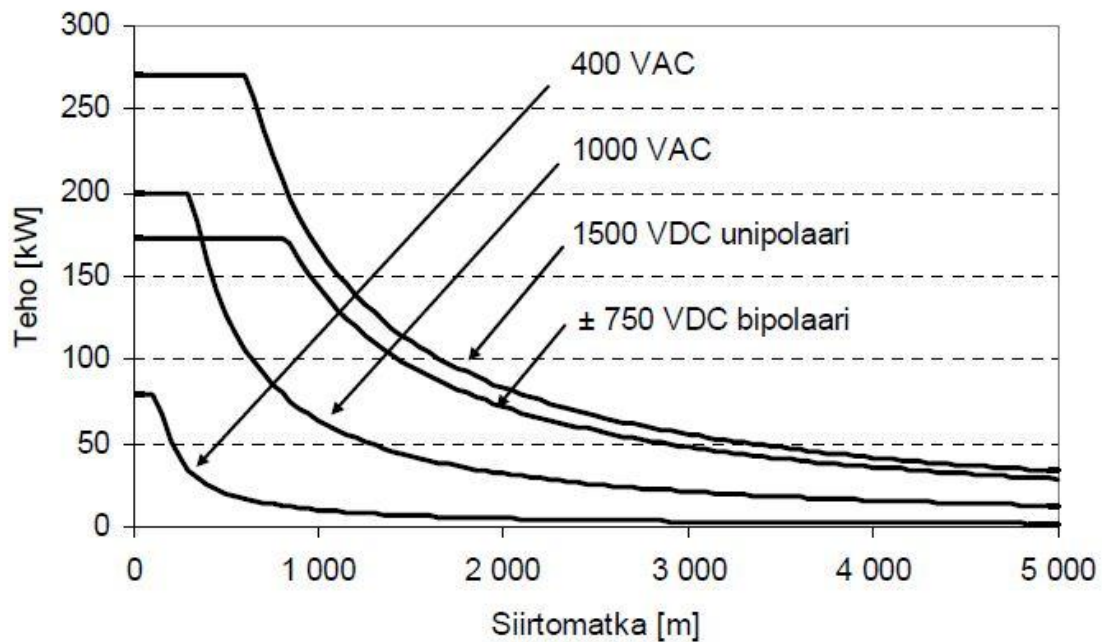
- suuri tehonsiirtokyky
- tehohäviöiden pieneneminen
- sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden paraneminen ja
- hajautetun energiantuotannon helpompi liittäminen sähkönjakeluverkkoon.

Useat sovellukset toimivat tasajännitteellä, joten nykyisen vaihtojänniteverkon vuoksi useisiin sovelluksiin vaaditaan tasasuuntausta. Tasasuuntaus lisää häviöitä. Uusiutuvia energialähteitä suunnitellaan käytettäväksi lähitulevaisuudessa sähkönverkon apuna, jotta saavutettaisiin luotettavampi sähkönjakelu. Uusiutuvien energialähteiden liittäminen verkkoon saadaan toteutettua helpommin tasajännitteisenä kuin vaihtojännitteisenä. (Hammerstrom 2007.)

Kuvassa 1 nähdään eri jännitteensiirtotapojen maksimijännitteet siirrettävän matkan funktiona. Kyseessä on täysin resistiivinen kuorma ja käytössä on myös tasajännitesiirottoon soveltuva AMKA  $3 \times 35 + 70 \text{ mm}^2$  riippukierrekaapeli (Salonen 2006: 42). Kuten kuvasta nähdään, esimerkiksi perinteisen  $400 \text{ V}_{\text{ac}}$  siirtotavalla 500 m matkalla siirrettävä maksimiteho on noin 20 kW, kun taas  $1\,500 \text{ V}_{\text{dc}}$  unipolaarisella siirtotavalla 500 m matkalla voidaan siirtää noin 270 kW.  $400 \text{ V}_{\text{ac}}$  ja  $1\,500 \text{ V}_{\text{dc}}$  unipolaarisen siirtotavan välinen ero tehonsiirrossa 500 m matkalla on siis jopa 12-kertainen. Bipolaarista siirtotapaa käytettäessä 500 m matkalla maksimisiirtoteho on noin 175 kW. Bipolaarista  $\pm 750 \text{ V}_{\text{dc}}$  siirtotapaa ja  $400 \text{ V}_{\text{ac}}$  siirtotapaa verrattaessa ero on puolestaan yli 8-kertainen.

Jos halutaan siirtää esimerkiksi 50 kW tehoa, niin  $400 \text{ V}_{\text{ac}}$  siirtotavalla voidaan siirtää noin 250 m matka,  $\pm 750 \text{ V}_{\text{dc}}$  bipolaarisella siirtotavalla noin 3 000 m matka ja  $1\,500 \text{ V}_{\text{dc}}$  unipolaarisella siirtotavalla noin 3 500 m matka. Kuvan 1 perusteella voi-

daankin siis päätellä, että tasajännitteisenä tehoa voidaan samaa johdinta käytettäessä siirtää paljon pidempiä matkoja kuin vaihtojännitteisenä. Hyvän siirtokykynsä ansiosta esimerkiksi rannikolla olevien tuulivoimaloiden sähkönsiirto on suositeltavaa tehdä tasajännitteisenä.



**Kuva 1.** Siirtomatkat eri jännitteensiirtotavoilla, kun sallittu jännitteenalenema on 6 % (Salonen 2006: 42).

### 2.3 Tasajännitteisen sähkönsiirron haasteet

Tehoelektroniikan komponentit ovat olennaisin osa tasajännitteistä sähkönjakelua. Vaihto- ja tasasuuntaajien määrä lisääntyy tasajänniteverkkoa käytettäessä. Tehoelektroniikan käytöllä uskotaan saavutettavan parempi sähkön laatu tulevaisuudessa, mutta uuden tekniikan käyttöönottamisessa on kuitenkin omat riskinsä ja vikojen mahdollisuudet lisääntyvät. Vaihtosuuntaajat tuottavat myös ääntä toimiessaan tietyillä taajuuksilla. (Voutilainen 2007: 21.)

Suuntaajien käyttö aiheuttaa verkkoon yliaaltoja. Yliaaltojen lisääntyminen sähkönjakeluverkossa saattaa näkyä asiakkaalle sähkön laadun heikkenemisenä. Yliaaltoja voidaan kuitenkin ehkäistä ja suodattaa verkkoon rakennettavilla suotimilla.

Tehoelektroniikan käytöstä aiheutuu myös häviöitä, huolto- ja ohjauskuluja. Suuntaajilta vaaditaan vähintään samaa hyötysuhdetta kuin käytössä olevilta perinteisiltä muuntajilta. Suodattimen sisältävän suodattimen hyötysuhteen on suositeltava oltavan vähintään 98 %. (Partanen, Pyrhönen, Silventoinen, Niemelä, Lindh, Kaipia, Salonen, Nuutinen, Peltoniemi & Lassila 2007.)

Tehoelektronisten komponenttien hyötysuhde määrittelee suurimmaksi osaksi koko pientasajännitejakeluverkon kannattavuuden. Kannattavuuden kannalta onkin tärkeää, että tehoelektroniikka kehittyy jatkuvasti. Teollisuudessa jo käytössä olevien tehoelektronikkalaitteiden käyttökokemukset ovat hyviä. (Partanen ym. 2007.)

Tehoelektronikkalaitteiden käyttöikä on noin 15–20 vuotta eli nykyiseen sähköverkoissa käytettävään tekniikkaan verrattuna laitteet joudutaan uusimaan 1–2 kertaa. Lyhytikäisimmät komponentit ovat suodatinkondensaattoreita ja puhaltimia. Uusimisesta voi tosin olla myös hyötyä, koska lyhyemmällä uusimisvälillä verkkoon saadaan kehittyneempiä laitteita. Järjestelmän luotettavuuden kannalta on hyvä kehittää mahdollisimman yksinkertainen huolto-ohjelma, jotta komponenttien uusiminen onnistuisi pienellä vaivalla eikä aiheuttaisi ylimääräisiä kuluja. (Partanen ym. 2007.)

Suojauksen osalta suurimmat haasteet tulevat maasta erotetun verkon suunnatusta maasulkusuojauksesta ja kytkinvikojen käytännön suojaratkaisuista. Periaatteessa tasajänniteverkko voitaisiin toteuttaa käyttömaadoitettunakin, mutta maasta erotettu verkko on suositeltavaa suurien jännitteiden vuoksi. Käyttömaadoitetusta verkosta syntyy Suomen maadoitusolosuhteissa suuria maadoitusjännitteitä, mutta maasta erotettuna maadoitusjännitteet jäävät reilusti alle sallittujen maksimiarvojen. (Partanen ym. 2010: 81–82.)

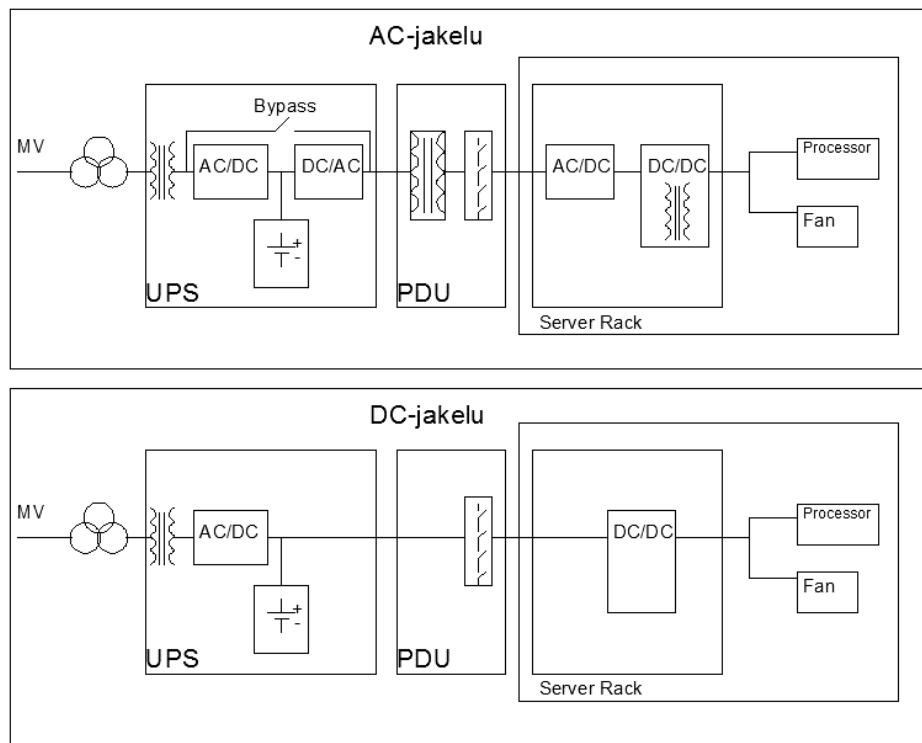
## 2.4 Pientasajännitekojeiston käyttökohteita

Tasajännitteen jakelua on mahdollista hyödyntää esimerkiksi laivojen moottorien ja muun elektroniikan sähköistyksessä, kiinteistöjen sähköistyksessä, ATK-keskuksissa, teollisuusverkoissa ja taajamien valaistuksessa. Edellä mainituissa käyttökohteissa tasajännite täytyy muuntaa kuormille sopivaksi. Tasajännitteen jakelukojeistossa täytyy olla sopivat lähdöt suoraan tasajännitteisille kuormille, vaihtojännitteisille kuormille tarvittava vaihtosuuntaus ja moottoreille omat lähdöt, jotka sisältävät moottoreille tarvittavat suojaukset.

Tietoliikenteessä suuret ATK-keskukset kuluttavat paljon sähköä, koska palvelimet ovat käytössä koko ajan ja keskuksissa voi olla satoja palvelimia. Tietokoneet toimivat tasajännitteellä. Jakeluverkolta tuleva vaihtojännite voidaan tasasuunnataa ennen sähkönjakelukojeistoa, jolloin kojeisto syöttää tasajännitettä edelleen tietokoneille. Jännite on sähkön laadun kannalta tasasuunnattava ennen sähkönjakelukojeistoa, koska tasasuuntaukseen tarvitaan useita komponentteja jotka lisäävät laitteista ja häviöistä aiheutuvia kustannuksia. Myös vikojen mahdollisuus lisääntyy useiden komponenttien takia. Viat heikentävät sähkön laatua asiakkaan näkökulmasta, koska tasasuuntaukseen käytettävään komponenttiin tuleva vika voi sammuttaa ATK-keskuksen sähkönjakelun, ellei sähkönjakelukojeistossa ole UPS-järjestelmää. Vähemmällä komponenteilla parannetaan myös verkon luotettavuutta. (Salomonsson & Sannino 2007: 1627.)

Kuvassa 2 on esitetty sekä vaihto- että tasajännitteinen sähkönjakelu ATK-keskukselle. Kuten kuvasta nähdään, tasajännitteisenä toteutetussa ATK-keskuksen sähkönjakelussa on vähemmän komponentteja ja vaihto- sekä tasasuuntauksia kuin vaihtojännitteisessä sähkönjakelussa. Pienemmällä komponenttien määrällä säästetään laitekustannuksissa, häviöissä ja huoltokustannuksissa.





**Kuva 2.** ATK-keskuksen tasa- ja vaihtojännitteinen sähkönjakelu (Rajagopalan ym. 2010).

Tasajänniteverkolla saataisiin parannettua sähkön laatua energiavarastoiden avulla ja komponenttien vähyydellä saataisiin kojeiston sisäisten vikojen mahdollisuuksia vähennettyä. Komponenttien määrä ja vähäisemmät tasa- ja vaihtosuuntaukset pienentäisivät myös tehohäviöitä, jolloin verkon energiatehokkuus kasvaisi. Suurille ATK-keskuksille olisikin potentiaalista kehittää tasajännitejärjestelmä, jolla voitaisiin syöttää kuormille sopivat jännitteet tutkimuksessa suunniteltavan sähkönjakelukojeiston avulla.

Esimerkiksi ATK-keskuksien ja pankkien palvelimet ovat niin sanottuja kriittisiä tietoliikennejärjestelmiä, joiden täytyy olla toimintakelpoisia yleisen jakeluverkon vioista huolimatta. Tasajänniteverkossa voidaan käyttää varaenergianlähteenä keskeytymätöntä sähkönjakelua (UPS) ja esimerkiksi dieselgeneraattoreita. Myös vaihtojänniteverkossa käytetään keskeytymätöntä sähkönjakelua.

Tasajännitteellä syötettävät ATK-keskukset olisivat erinomaisia käyttökohteita tasajännitteiselle sähkönjakelukojeistolle, koska se voisi toimia ATK-keskuksen pääjakeluko-

jeistona eli MDB-yksikkönä (Main Distribution Board). Tasajännitteinen jakelukojeisto sijoitettaisiin tasajännitejakeluverkon ja kuormien väliin. Jakelukojeistolta saataisiin tasajännite suoraan IT-laitteille (Information Technology) ja tarvittaessa vaihtojännitettä AC kuormille. Jakelukojeiston pääkatkaisijalla saataisiin erotettua ATK-keskus yleisestä jakeluverkosta tarpeen vaatiessa, etteivät esimerkiksi oikosulkuvirrat pääsisi vaurioittamaan IT-laitteita. ATK-keskusta syöttävälle tasajänniteverkolle voitaisiin rakentaa myös keskeytymätön sähkönjakelu (UPS). UPS-järjestelmä sisältää varaenergianlähteen, esimerkiksi akuston, jota tasajänniteverkko voi ladata ilman erillisiä vaihtosuuntauksia.

Laivoissa tasajänniteverkolla saataisiin parannettua verkon luotettavuutta. Generaattoreilla sähkö saadaan tuotettua laivan moottoreille. Generaattorin ja kuormien väliset yhteydet ovat usein liian pitkiä pienjänniteverkolle eikä laivaan ole järkevää rakentaa keskijänniteverkostoa muun muassa tilan puutteen takia. Tasajänniteverkkoa käyttämällä saadaan parannettua laivan jakeluverkon siirtokapasiteettia ja energiatehokkuutta. Generaattorit voidaan tasasuunnata yksinkertaisimmillaan diodisiltatasasuuntaajalla, mutta paremman säädettävyyden takia on parempi käyttää aktiivisiltaa, kuten tyristori- tai IGBT-siltaa. Tasajännitejärjestelmä tulee olemaan kokonaisuutena edullisempi ja energiatehokkaampi kuin kilpailevat vaihtojännitejärjestelmät. Edullisuuteen vaikuttaa yksinkertaisempi tehoelektroniikka ja pienemmät johtopoikkipinnat. (Partanen 2008: 85–86.)

Tasajännitteinen jakelukojeisto voitaisiin sijoittaa generaattorin tasasuuntauksen ja kuormien välille. Tasasuuntauksen jälkeen tasajännite ohjattaisiin moottoreille, tasajännitekuormille ja tarpeen vaatiessa vaihtojännitekuormille. Tasajännitteisen jakelukojeiston kotelointi täytyy kuitenkin olla laivan olosuhteisiin sopiva, joten kojeiston kotelointi on poikkeava verrattuna yleisiin käyttökohteisiin.

Teollisuusverkoissa tasajännitteen käyttöä on hyödynnetty jo pitkään, mutta yleisesti tasajänniteverkkoon on sisältynyt vain tasajännitekiskostot, joilla moottorikuormia on kytketty muuhun sähköverkkoon. Tasajännitejakelua käyttämällä saadaan energiatehokkuutta parannettua myös teollisuudessa. (Mäkitalo 2008.)

Tässä tutkimuksessa suunniteltavaa tasajännitteen jakelukojeistoa voidaan käyttää teollisuudessa syöttämään moottoreille joko tasa- tai vaihtojännitettä tarpeen mukaan. Teollisuuslaitoksen valaistus voidaan toteuttaa esimerkiksi jakelukojeiston tasajännitelähdöillä, jolloin valaistukseen ei tarvita ylimääräisiä tasa- tai vaihtosuuntauksia. Koko teollisuuslaitoksen sähköistys voidaan toteuttaa tasajännitteisellä sähkönjakelukojeistolla. Kojisto syöttää tasa- tai vaihtojännitettä kuorman tarpeesta riippuen.

Pientasajänniteverkkoon kytkettyjen kiinteistöjen sähkönjakeluun tarvitaan jakelukojeisto, joka jakaa sekä tasa- että vaihtojännitteen niitä tarvitseville kuormille. Esimerkiksi kiinteistön lämmitys voidaan toteuttaa tasajännitteisenä ja myös tasajännitelaitteille on omat lähdöt. Kojistosta täytyy olla jakelu myös vaihtojännitteisille kuormille, koska useat kotitalouslaitteet käyttävät nykyään vaihtojännitettä. Tasajännitteisestä sähkönjakelukojeistosta saataisiin jaettua sekä tasa- että vaihtojännite suoraan kuormille. Tasajännitteistä sähkönjakelukojeistoa käyttämällä säästyttäisiin esimerkiksi jokaisen talouden omalta vaihtosuuntaukselta ennen loppukäyttöä. Vähemmällä tehoelektronikan käytöllä säästettäisiin investoinneissa, käyttökuluissa ja parannettaisiin kotitalouksien energiatehokkuutta. (Mäkitalo 2008.)

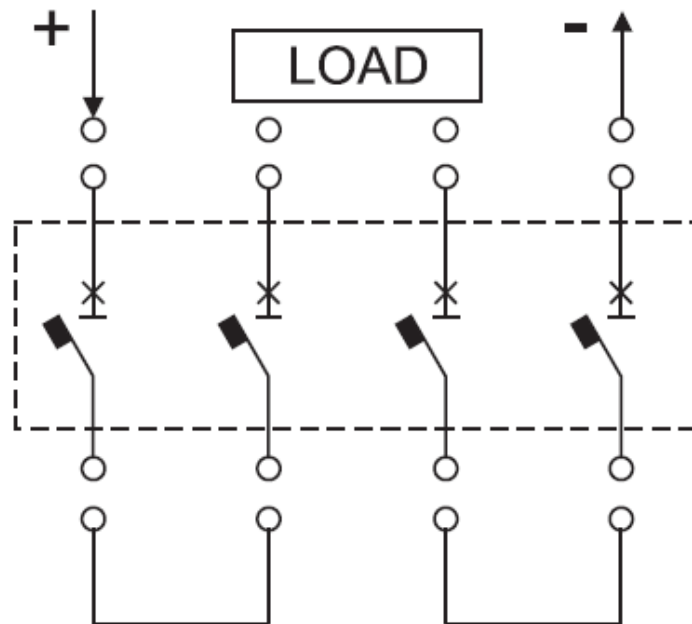
### 3 TASAJÄNNITEVERKON KOMPONENTIT

Tasajänniteverkossa on useita erilaisia komponentteja joita ei käytetä vaihtojänniteverkossa. Yleensä tasajänniteverkkoa syöttävä keskijänniteverkko on vaihtojännitteinen, joten ennen tasajännitteenjakelukojeistoa jakeluverkon jännite tasasuunnataan. Tasasuunnauksen lisäksi jännite täytyy muuntaa pienjännitteeksi (max. 1 500 V<sub>dc</sub>). Erilaisissa tasajänniteverkoissa ja sovelluksissa tarvitaan lisäksi katkaisijoita, joilla katkaisijan takana oleva kojeisto saadaan kytkettyä pois verkosta vian sattuessa. Tässä kappaleessa käydään läpi yleisesti tasajänniteverkossa ja sen sovelluksissa tarvittavia komponentteja.

#### 3.1 Ilma- ja kompaktikatkaisija

Tasajännitekojeistoissa pääkatkaisijana käytetään yleensä automaattista ilmakatkaisijaa, joka aukaisee piirin vian sattuessa, etteivät mahdolliset oikosulkuvirrat ja viat vahingoita katkaisijan takana olevia komponentteja. Ilmakatkaisijoita voidaan käyttää myös erilaisissa tuotantolaitoksissa, laivoissa, kaivoksissa, muuntamoissa ja missä tahansa pää- ja jakelukojeistoissa (ABB 2011a). Katkaisijaksi on mahdollista valita myös manuaalinen kytkin. Kytkimillä ei ole automaattista suojarelettä, joten ne ovat passiivisia katkaisijoita. Kojeistoissa paras ratkaisu onkin käyttää ilmakatkaisijaa, koska se on aktiivinen katkaisija sisältäen automaattisesti toimivan suojareleen.

Ilmakatkaisijan napaluvun valintaan vaikuttavat esimerkiksi käytettävän syöttöjännitteen suuruus ja maadoitustapa. 3-napaista kytkentää voidaan käyttää maadoitustavasta riippuen korkeintaan 750 V<sub>dc</sub> syöttöjännitteellä. 1 000 V<sub>dc</sub> syöttöjännitettä käytettäessä on ainoana vaihtoehtona 4-napainen kytkentä, jossa sekä plus- että miinusnavat kytketään sarjaan kahteen ilmakatkaisijan napaan kuvan 3 mukaisesti. Syöttöpuolen plus- ja miinusnavat kytketään ilmakatkaisijan napoihin. Ilmakatkaisijan navat yhdistetään toisiinsa kuvan 3 mukaisesti kuparilevyllä ja katkaisijalta lähtevät navat kytketään sarjaan syötöltä tulevien napojen kanssa.

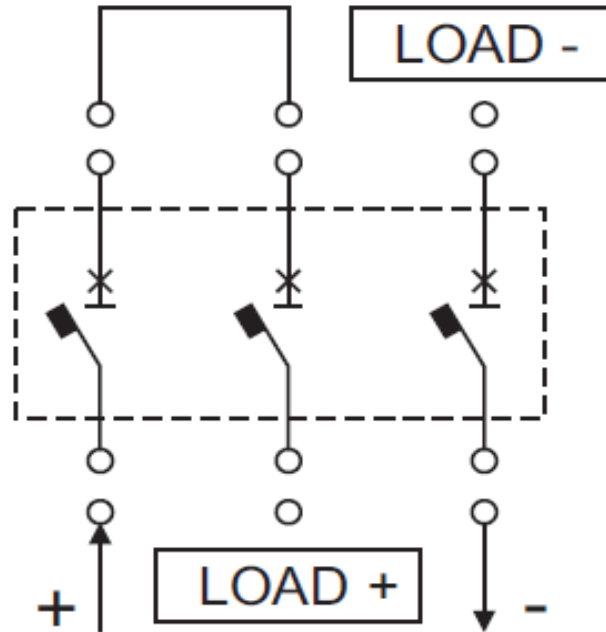


**Kuva 3.** Emax-ilmakatkaisijan 4-napainen sarjaankytkentä (ABB Sace 2011).

Tasajännitteellä ei ole luontaisia nollakohtia, kuten sinimuotoisella vaihtojännitteellä. Tasajännitteellä luontaisten nollakohtien puuttuminen vaikeuttaa jännitteen katkaisua esimerkiksi vian sattuessa. Mikäli käytetään 4-napaista ilmakatkaisijaa, tasajännitekäytössä saadaan kaksi ilmaväliä molempiin vaiheisiin yhdistämällä kahden navan päät toisiinsa. 4-napaisen ilmakatkaisijan kahden ilmavälin avulla tasajännite saadaan poiskytettyä helpommin.

3-napainen ilmakatkaisija tuottaa vähemmän häviötehoa kuin 4-napainen kytkentä. 3-napaisena kytkettävän ilmakatkaisijan hinta on edullisempi kuin 4-napaisen ilmakatkaisijan. Kun kytkettäviä napoja on vähemmän, niin ilmakatkaisijan ja kiskoston välillä käytettävää kuparia tarvitaan vähemmän. Kuparin määrä lisää myös häviöitä, kun kupari lämpenee. Kun kuparin määrä vähenee, myös kytkennästä aiheutuvien häviöiden määrä vähenee. 3-napainen ilmakatkaisija on myös kapeampi kuin 4-napainen ilmakatkaisija. Kapeampi ilmakatkaisija mahtuu kapeampaan tilaan, jolloin saavutetaan myös kapeampi kojeiston kokonaisleveys. Pienempi kojeisto säästää myös tilan tarpeessa. Kuvassa 4

nähdään 3-napainen sarjaan kytkentä, jossa syötön plusnavalla on kaksi ja miinusnavalla yksi avausväli.



**Kuva 4.** Tasajännitteisen Emax-ilmakatkaisijan 3-napainen kytkentä (ABB Sace 2011).

Vaikka 3-napaisen katkaisijan valinnalla säästetään tilassa, kuparissa ja tehohäviöissä, niin 4-napaisen katkaisijan hyödyt ovat suuremmat, kun käytetään tasajännitettä. 4-napaisella katkaisijalla saatava varmempi katkaisukyky on hyödyllisempi ratkaisu varsinkin pääkatkaisijassa.

Ilmakatkaisijaan verrattuna kompaktikatkaisijat ovat pienempiä katkaisijoita, joiden virtarajat ovat myös pienemmät. Nimensä mukaisesti kompaktikatkaisijat mahtuvat paljon pienempään tilaan kuin ilmakatkaisijat. Kompaktikatkaisijoita käytetään pienjännitteellä 1–1 600 A virroilla esimerkiksi teollisuudessa ja sähkönjakelussa. Sähkönjakelussa kompaktikatkaisijoilla saadaan jaettua pääkatkaisijalta tuleva päävirta useisiin virtahaaroihin ja sitä kautta kuormille. Kompaktikatkaisijan katkaisukyky ja mekaaniset ominaisuudet perustuvat samaan periaatteeseen kuin ilmakatkaisijallakin. (ABB 2010.)

### 3.2 Vaihtosuuntaaja

Tasajännitettä vaihtojännitteeksi suuntaavaa komponenttia kutsutaan vaihtosuuntaajaksi. Aktiivinen vaihtosuuntaaja voi toimia tehonvirtaukseltaan kaksisuuntaisesti, eli jännitettä voidaan sekä tasa- että vaihtosuunnata. Kaksisuuntaisen vaihtosuuntaajan tarkoituksena on myös tuottaa sähköä verkkoon. Jos verkkoon ei ole tarvetta tuottaa sähköä ja halutaan säästää komponenttien kuluissa, voidaan käyttää halvempaa ratkaisua, joka toimii ainoastaan vaihtosuuntaukseen. (Alanen & Kylkisalo 2007.)

Aktiivisen vaihtosuuntaajan käyttöä suositellaan, koska sillä saadaan asiakkaalle ulostuleva yksivaiheinen  $230\text{ V}_{ac}$  tai kolmivaiheinen  $400\text{ V}_{ac}$  pysymään lähes vakiona, vaikka vaihtosuuntaajan tulojännite vaihtelisikin kuormitustilanteen mukaan. Aktiivista vaihtosuuntaajaa käytettäessä voidaan sallia suuremmat jännitteen alenemat jakeluverkossa ja voidaan korjata jännitekuoppien vaikutuksia. (Voutilainen 2007: 18.) Jos tasajänniteverkkoon liitetään tarpeeksi paljon hajautettua energiantuotantoa, aktiivisia suuntaajia käyttämällä voidaan tasajänniteverkkoa käyttää myös omana saarekkeena, jolloin tasajänniteverkko ei ole riippuvainen sähkönjakeluverkosta (Partanen 2010: 46). Jos suunniteltavaan kojeistoon kytketään moottoreita, niin aktiivisen vaihtosuuntaajan käyttö on perusteltua, koska silloin jarruttava vaihtovirtamoottori voi tuottaa sähköä tasajänniteverkkoon päin. Kun toinen moottori käyttää sähköä samanaikaisesti, niin jarruttavan moottorin tuottama sähkö saadaan hyötykäyttöön.

Vaihtosuuntaajan ulostulevan jännitteen täytyy täyttää tietyt kriteerit, joihin yksittäinen käyttäjä ei voi vaikuttaa vaan laatuun vaikuttaa koko vaihtojännitteinen jakeluverkko. Tarkasteltaviin kriteereihin kuuluu taajuus, jännitetason vaihtelu ja harmoninen särö THD (Total Harmonic Distortion) joiden vaatimuserot ovat standardin (SFS-EN 50160) mukaan (Nuutinen & Salonen & Peltoniemi & Silventoinen 2008.):

- Taajuuden  $f$  täytyy olla vähintään  $50\text{ Hz} \pm 1\%$ , 99,5 % vuodesta
- jännitetason vaihtelu saa olla enintään  $230\text{ V} \pm 10\%$
- harmoninen särö (THD) täytyy olla jännitteellä alle 8 % ja virralla alle 5 %.

### 3.3 Tasasuuntaaja

Tasasuuntaaja on tasajänniteverkon peruslaite, kun sähköä syötetään vaihtojänniteverkosta tasajänniteverkkoon. Tasasuuntaajan tehtävänä on tasasuunnata vaihtojännitettä esimerkiksi vaihtojännitteisestä jakeluverkosta tasajännitteisille kuormille.

Tasasuuntaajan toteutustapana on diodi-, tyristori- tai IGBT-silta. Transistoreista IGBT on käytännöllisin, koska sen jännite- ja virtakestoisuus on riittävän suuri pienjännitteeseen sähköjakeluun. IGBT-transistoreilla saadaan aktiivinen, ohjattu silta, mutta IGBT-transistorit ovat esimerkiksi diodeja kalliimpia. Tyristorien sytytyskulmaa voidaan ohjata, mutta tällöin ohjaus on rajallista. IGBT- ja tyristorisilloilla saadaan suunnattua tehoa myös tasajänniteverkosta poispäin, mutta yleensä tasasuuntaajaa tarvitaan tasajännitekojeistoissa vain tasasuuntaukseen. (Alanen & Kylkisalo 2007: 49.)

Yksinkertaisin ja edullisin tasasuuntaaja saadaan toteutettua diodi-sillalla, jolloin tasasuuntaajalla ei voi ohjata tehoa tasajänniteverkosta poispäin (Alanen & Kylkisalo 2007: 49). Diodisilta kestää suuria jännitteitä ja virtoja. Diodisillan suurimpia etuja ovat sillan edulliset valmistuskulut ja hyvä hyötysuhde. Koska diodisiltaa ei voi ohjata, sen ulostulevan tasajännitteen suuruus on riippuvainen kolmivaiheisen syöttöjännitteen amplitudista. Tasasuuntaajan silta voidaan toteuttaa 6- tai 12-pulssisena. (Rekola 2009: 13.)

Mikäli tasajänniteverkkoon on liitetty energiantuotantoa, kuten uusiutuvia energialähteitä esimerkiksi tuulivoimaa tai aurinkoenergiaa, joilla voidaan tuottaa sähköä myös verkkoon päin, on tasasuuntaajassa tarpeen käyttää kaksisuuntaista IGBT- tai tyristorisiltaa (Partanen 2010: 46).

Kun kuormia tai lähteitä syötetään kolmivaihetasasuuntaussillan avulla, pääjännitteen arvon ja tasajännitteen välinen suhde saadaan laskettua yhtälöstä

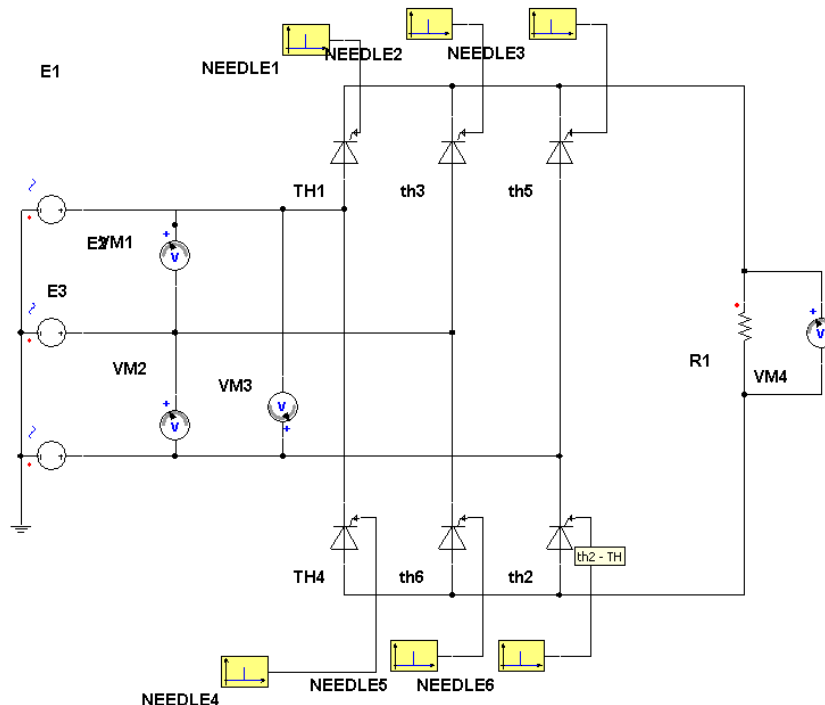
$$U_{DC} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{main} \approx 1,35 \cdot U_{main}, \quad (2)$$



missä  $U_{DC}$  on tasajänniteverkon nimellijännite ja  $U_{main}$  on kolmivaiheisen lähteen pääjännite.

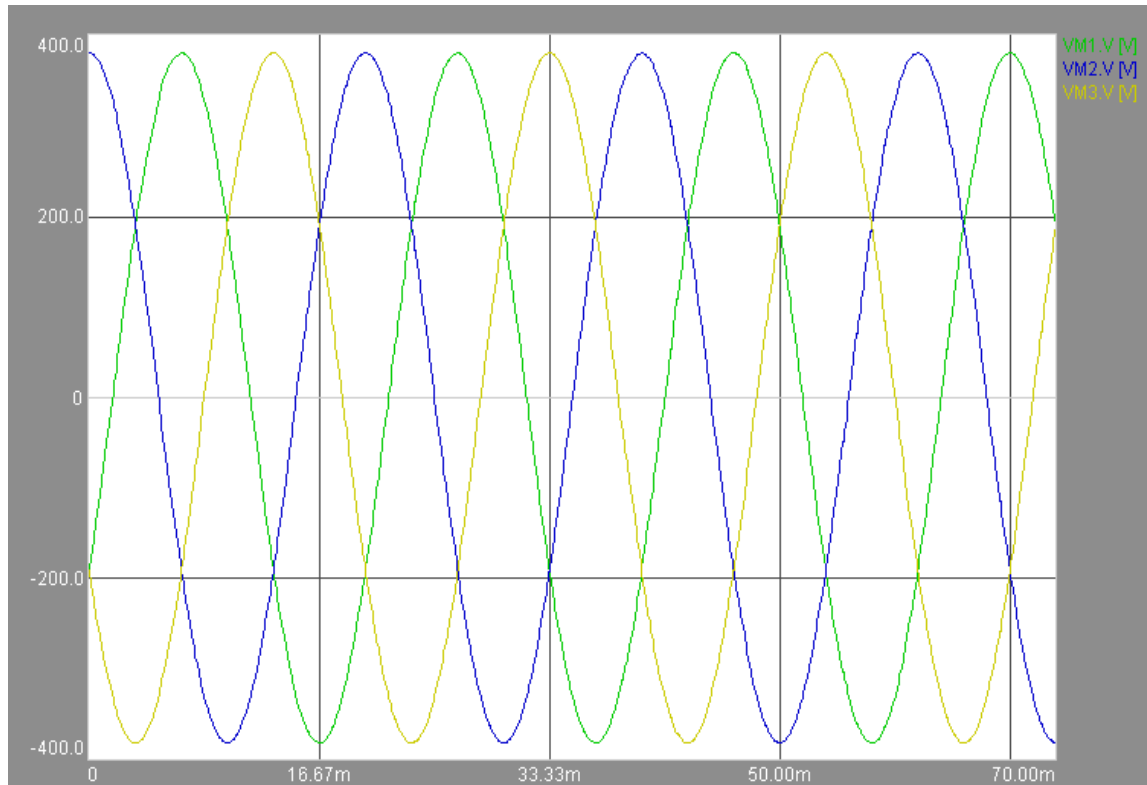
Kuvasta 6 nähdään 6-pulssinen tasasuuntaaja, joka on toteutettu tyristorisillalla. Tyristorit toimivat pareittain vakioviiveellä toisiin pareihin nähden. Tyristorisillalla toteutettu tasasuuntaaja on ohjattu tasasuuntaaja. Kyseistä tasasuuntaajaa voidaan käyttää vaatimammissakin käyttökohteissa joissa tarvitaan sähkön suuntausta myös tasaverkosta pois päin. (Alanen & Kylkisalo 2007: 49.) Ohjattua tasasuuntaajaa ohjataan ohjauskulman  $\alpha$  arvoilla. Ohjauksen avulla suuntaajan kynnysvirta saadaan pienemmäksi ja tasajännitteen keskiarvo saadaan ohjattua halutuksi.

Kuvan 5 tasasuuntaajaa simuloitiin Simplorer-ohjelmistolla, jotta nähdään kolmivaiheisen vaihtojännitteen tasasuuntaus. Tasasuuntaajaan syötetään kuvan 7 mukainen sinimuotoinen kolmivaiheinen vaihtojännite ja tyristorisilta tasasuuntaa jännitteen kuormalle kuten kuvasta 8 nähdään.



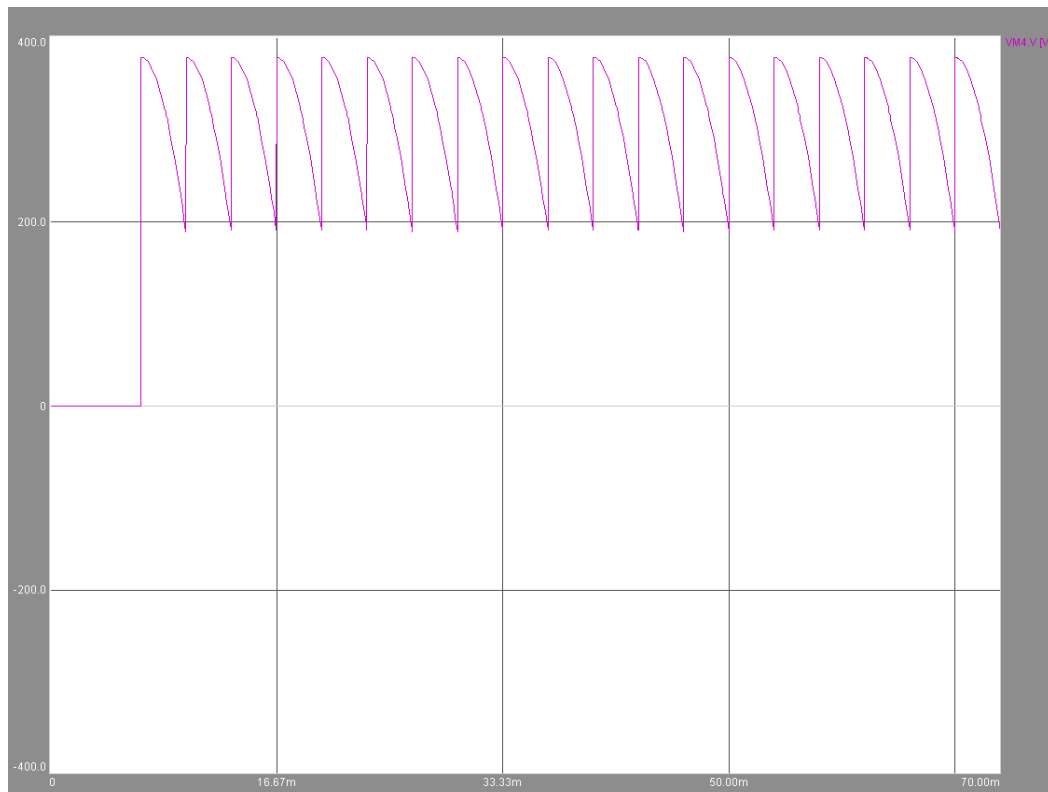
**Kuva 5.** Tyristoreilla toteutettu 6-pulssi tasasuuntaaja.

Kuvasta 6 nähdään syöttöjännitteenä toimiva kolmivaiheinen vaihtojännite. Tasasuuntauksen jälkeen ulostulona saadaan vaiheiden huippuarvot. Pulssiluvun mukaisesti kuvasta 8 nähdään, että ulostulevaan tasajännitteeseen tulee kuusi huippua yhdelle syöttöjännitteen jaksolle. Kun käytetään 12-pulssista tasasuuntaajaa, tasajännitteeseen tulee kaksitoista huippua.



**Kuva 6.** Kolmivaiheinen vaihtojännite ajan funktiona.

Kuten kuvasta 7 nähdään, tasasuuntaaja katkoo sinimuotoisen aallon ja jäljelle jää siniaallon huippuarvot. Tasasuuntauksen jälkeen jännite on käytettävissä tasajännitteisille kuormille.



**Kuva 7.** Tasasuuntauksesta ulostuleva jännite.

### 3.4 Muuntaja

Muuntaja on osa niin vaihto- kuin tasajännitteistä jakeluverkkoa. Muuntajaa käytetään esimerkiksi, kun halutaan pienentää jännitettä keskijänniteverkosta pienjännitteeksi. Tässä työssä suunniteltavaan tasajännitteen jakelukojeistoon ei kuitenkaan tulla liittämään muuntajaa, koska kojeistoon tuleva kolmivaiheinen vaihtojännite on valmiiksi muunnettu pientasajännitteeksi jakeluverkon puolella. Muuntajan valintaan vaikuttaa tasajänniteverkossa käytettävät vaihto- ja tasasuuntaajat sekä tasajänniteverkon toteutus-tapa (uni- tai bipolaarinen). Kun käytetään esimerkiksi bipolaarista tasajänniteverkkoa, jota tasasuunnataan tyristorisillalla, muuntajan edellytetään olevan kolmikääminen. Jos tasajänniteverkko toteutetaan unipolaarisena, muuntajaksi sopii parhaiten kaksikääminen jakelumuuntaja. Unipolaarisessa tyristorisilloilla toteutetussa tasajänniteverkossa

muuntajan muuntosuhde on 20/1,11 kV, jos halutaan pienjännitteen olevan 1500 V<sub>dc</sub>. (Partanen 2010: 73–74.)

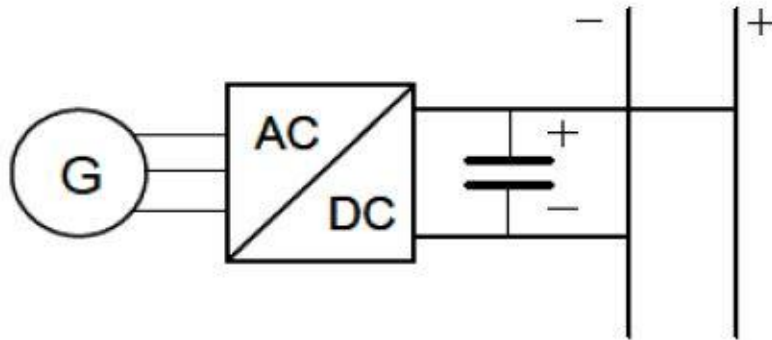
Kolmikääminen jakelumuuntaja on kalliimpi kuin kaksikääminen muuntaja, mutta kolmikäämisen muuntajan käyttö mahdollistaa myös diodi- ja tyristorisillan käytön tasasuuntauksessa. Tyristorisilta on halvempi ja yksinkertaisempi kuin IGBT-silta ja molemmat toimivat kaksisuuntaisesti, joten tasajänniteverkkoa suunniteltaessa täytyy ottaa huomioon myös mahdollinen energiantuotanto jakeluverkkoon päin. Kolmikäämistä jakelumuuntajaa käytettäessä on mahdollista toteuttaa tasajänniteverkko myös edullisella ja yksinkertaisella diodisillalla, mikäli kaksisuuntaista toimintoa ei tarvita. (Partanen 2010: 74.)

### 3.5 Kondensaattori ja suodatin

Tasajänniteverkon suodatinta käytetään suodattamaan sekä vaihto- että tasajänniteverkkoon päin suunnattujen jännitteiden säröilyä. Suodattimella saadaan tuotettua myös suuntaajien tarvitsemaa loistehoa ja tasoitetaan jännitteiden vaihteluja. Vaihtojännitepuolella suodatin suodattaa harmonisia yliaaltoja, joita suuntaaja syöttää verkkoon päin. Tasajännitepuolen suodatinta käytetään avojohdoilla toteutetussa verkossa. Tasajännitejakelussa voidaan käyttää sekä passiivisia että aktiivisia suodattimia. Yleisimpiin suodatinkomponentteihin kuuluvat kondensaattorit, vastukset ja kuristimet. (Alanen & Kylkissalo 2007.)

Kondensaattori on hyvä suodatinkomponentti. Tasajänniteverkossa kondensaattorin tehtävänä on suodattaa ja stabiloida tasajänniteverkossa syntyviä häiriöitä. Vaihtojännitepuolella syntyviä häiriöitä, kuten yliaaltoja, voi kulkeutua tasasuuntaajan kautta tasajänniteverkon puolelle. Vaihtojänniteverkon häiriöiden takia kondensaattori on hyvä sijoittaa kuvan mukaisesti heti tasasuuntauksen jälkeen, etteivät häiriöt pääse tasajänniteverkossa kuormille saakka. Kuvasta 8 nähdään kuinka kondensaattori on kytketty tasajännitesuuntauksen jälkeen plus ja miinusnapojen välille. Kuvassa nähtäviä suodatuskondensaattoreita olisi hyvä sijoittaa jokaiselle tasasuuntaajalle omansa, jotta tasajännite-

verkossa olisi aina tarvittava määrä suodattimia jokaiselle tasasuuntaajalle. Suodatuskondensaattorien mitoitus tehdään aina tasasuuntaajan mukaan. (Alanen & Kylkisalo 2007.)



**Kuva 8.** Tasajännitekiskoon kytketty kondensaattorisuodatin (Alanen & Kylkisalo 2007).

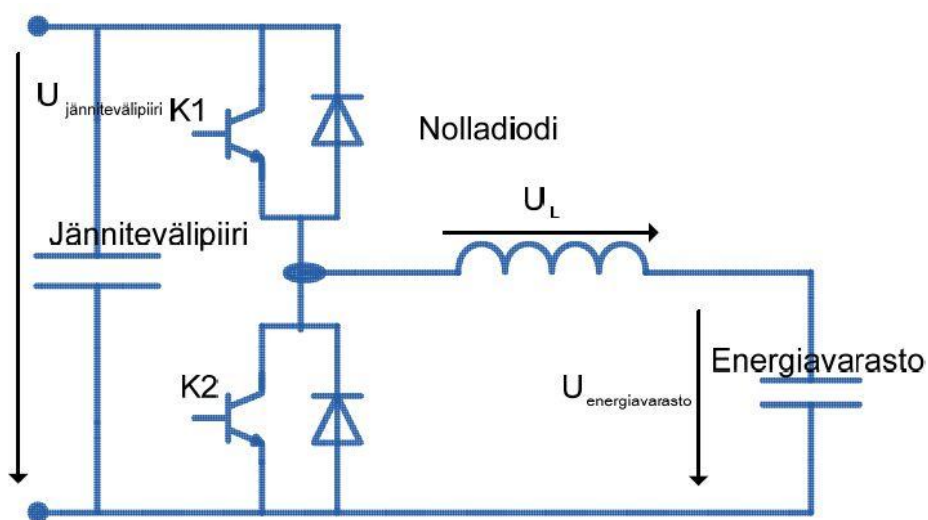
### 3.6 Tasajännitemuunnin

Tasajännitemuunnin toimii tasajänniteverkossa liityntärajapintana kahden erisuuruisen tasajänniteportaan välillä. Tasajännitemuunninta käytetään tasajänniteverkossa joko nostamaan tai laskemaan sisään tulevaa tasajännitettä. Muunnin voidaan valita käyttökohteen mukaan joko jännitettä nostavaksi (boost converter), jännitettä laskevaksi (buck converter) ja jännitettä sekä nostavaksi että laskevaksi (buck-boost converter). Muuntimen peruskomponentit koostuvat kuristimesta, kytkimestä, diodista ja suodatinkondensaattorista. (Mäkitalo 2008: 14.) Tasajännitemuuntimen suunnittelussa suuri haaste on saada hyvä hyötysuhde. Nykyisten muuntimien hyötysuhde on noin 90 % ja halvempia muunninratkaisuja hankittaessa hyötysuhde laskee vieläkin heikommaksi, jolloin koko tasajänniteverkon hyötysuhde heikkenee. (Alanen & Kylkisalo 2007.)

Tasajännitemuunninta voidaan käyttää esimerkiksi tasajännitteisissä ATK-keskuksissa, kun kiskon jännite on suurempi kuin tietokoneen käyttöjännite. Kiskolta tuleva jännite

(esimerkiksi  $220\text{ V}_{\text{dc}}$ ) pudotetaan tietokoneen käyttöjännitteeksi ( $12\text{ V}_{\text{dc}}$ ) ennen jännitteen siirtoa tietokoneeseen.

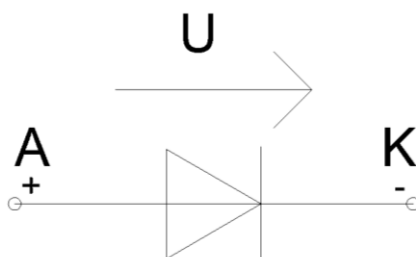
Tasajännitekiinteistöissä tasajännitemuunninta on mahdollisuus käyttää liityntärajapintana sähköjakeluverkon ja hajautetun energiantuotannon välillä, jolloin tasajännitemuunnin helpottaa eri jännitteen arvoilla toimivien hajautettujen energiantuotantomuotojen kytkemistä sähköjakeluverkkoon. Myös energiavarastojen purkaus- ja lataussäätö voidaan toteuttaa tasajännitemuuntimella. Energiavaraston purkautuessa, verkkoon suunnattu jännite saadaan muutettua verkolle sopivaan arvoon. Kuvassa 9 nähdään tasajännitemuuntimen rakenne, kun se on kytkettynä energiavarastoon. Tasajännitemuuntimen nolladiodi rajoittaa energiavaraston jännitettä, jolloin ulostulevan jännitteenarvo pienenee. Energiavaraston puolella oleva jännite rajoittuu, kun kuristimen ja energiavaraston jännitteiden summa nousee suuremmaksi kuin jännitevälipiirissä ja nolladiodi tulee johtotilaan. Esimerkin mukaiseen yhden tehoasteen tasajännitemuuntimeen tarvitaan erotuskytkin, koska se ei muuten pysty rajoittamaan energiavaraston purkautumista jännitevälipiirin matalampaan jännitetasoon. (Liukkonen 2008).



**Kuva 9.** Esimerkkikuva tasajännitemuuntimen rakenteesta (Liukkonen 2008).

### 3.7 Diodi

PN-diodi on puolijohdekomponentti jonka toinen puoli on p-tyyppinen seos ja toinen puoli on n-tyyppinen (Niiranen 2007: 4–5). PN-Diodi on yksinkertaisin puolijohdekomponentti joka ohjaa virtaa vain yhteen suuntaan. Diodin virtaa ohjaava ominaisuus perustuu p- ja n-puoliin jolloin virran suuntainen resistanssi on pieni ja virtaa vastustava resistanssi on todella suuri. Suuren vastustavan resistanssin ansiosta virta ei pääse kulkemaan kuin haluttuun suuntaan. Diodi ohjaa virtaa kuvan 10 mukaisesti anodilta (+) katodille (-), joten diodi on hyvä komponentti virran suunnan ohjaukseen yksinkertaisuutensa avulla. Jos diodin jännite on negatiivinen, niin diodin virta on nolla ( $I_{\text{diode}} = 0$ ). Kun diodi on päästösuunnassa, niin virta kulkee diodin läpi. Kun diodi ei päästä virtaa lävitseen, diodi on estosuunnassa. (Silvonen 2004: 219–220.)

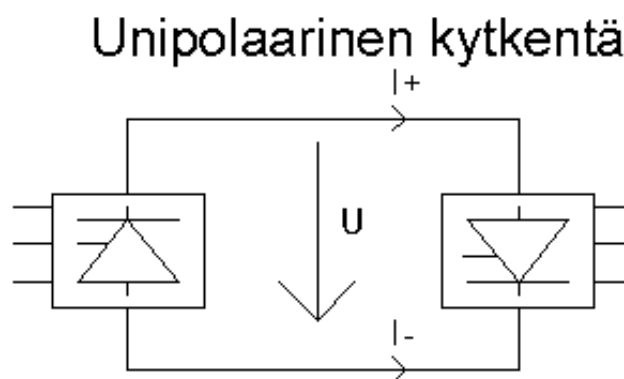


**Kuva 10.** Diodin piirrosmerkki.

Diodia voidaan käyttää kytkimenä, jota kynnysjännite ohjaa. Kun diodi saavuttaa kynnysjännitteen, niin diodi alkaa johtaa virtaa. Diodisiltaa käytetään usein tasasuuntauksessa, koska diodi päästää vaihtovirran vain yhteen suuntaan. Vaihtovirran negatiivinen puoli suodattuu pois, koska virta ei kulje vastakkaiseen suuntaan. (Silvonen 2004: 219–220.)

### 3.8 Bipolaari- ja unipolaari siirtoverkko

Tasajänniteverkon toteuttamiseksi voidaan käyttää joko kaksi- tai kolmijohtimista siirtoverkkoa. Unipolaarinen (kaksijohtiminen) siirtoverkko toteutetaan vaiheen ja nollan välille korkeintaan  $1500\text{ V}_{\text{dc}}$  jännitteellä. Unipolaarisessa siirtoverkossa on käytössä yksi jännitetaso tehonsiirtoon. Toinen johtimista toimii virran meno- ja toinen paluujohtimena kuten kuvasta 11 nähdään. Unipolaarisessa siirtoverkossa käytetään yhtä suuntaajaa verkon molemmissa päissä. Suuntaajat valitaan tarpeen mukaan joko vaihto- tai tassa-suuntaajiksi. Jakeluverkon päässä jännite tasasuunnataan ja asiakkaan puolella vaihtosuunnataan takaisin kuormille sopivaksi, kun kyseessä on vaihtojännitettä käyttäviä laitteita. (Salonen 2006.)

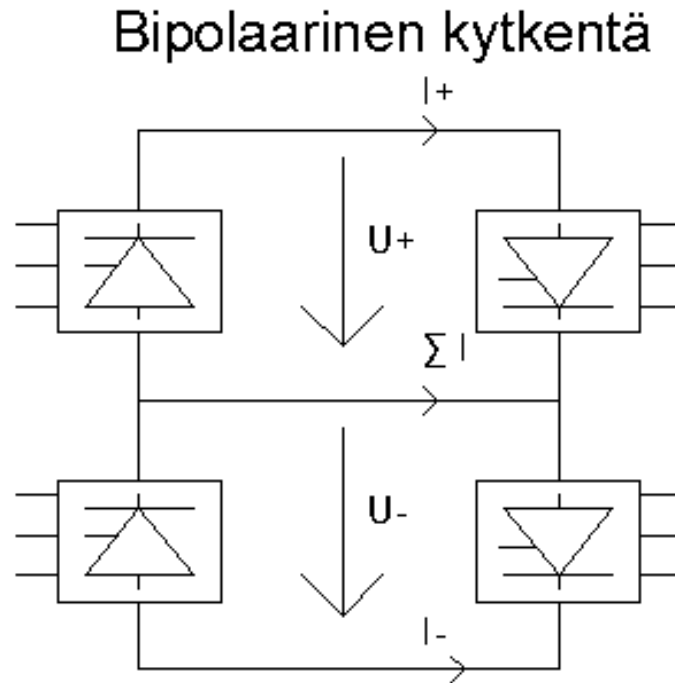


**Kuva 11.** Unipolaarisen siirtoverkon kytkentäkuva kaksijohtimisella pienjännitejohdolla (Partanen 2008: 12).

Kuvassa 12 esitettävä bipolaarinen (kolmijohtiminen) siirtoverkko toteutetaan kahden vaiheen ja nollan välille, jolloin bipolaarisessa siirtoverkossa on käytössä kaksi jännitetasoa. Bipolaarisessa verkossa ensimmäisen vaiheen ja nollan välillä on korkeintaan  $+750\text{ V}_{\text{dc}}$  jännite ja nollan ja toisen vaiheen välillä jännite on korkeintaan  $-750\text{ V}_{\text{dc}}$ . Bipolaarisessa siirtoverkossa käytössä on vastaavat suuntaajat kuin unipolaarisessa siirtoverkossa, mutta molemmissa päissä tarvitaan kaksi suuntaajaa molempien vaiheiden ja nollajohtimen välillä kuten kuvassa on esitetty. (Salonen 2006.) Jos uni- tai bipolaarista siirtoyhteyttä käytetään tasajänniteverkossa, niin tasasuunnattua jännitettä ei tarvitse vaihtosuunnata. Kun vaihtosuuntausta ei tarvita, niin suuntaajia tarvitaan vain syöttö-



puolelta tulevan vaihtojännitteen tasasuuntaamiseen, jolloin tarvitaan vähemmän suuntaajia kuin kuvissa on esitetty.



**Kuva 12.** Bipolaarisen siirtoyhteyden kytkentäkuva kolmijohtimisella pienjännitejohdolla (Partanen 2008).

## 4 TASAJÄNNITTEISEN SÄHKÖNJAKELUKOJEISTON RAKENNE JA KOMPONENTIT

Tasajännitteisen sähkönjakelukojeiston pääosat ovat pääjakelukojeisto eli MDB-yksikkö (Main Distribution Board), keskeytymätön sähkönsyöttö eli UPS-yksikkö (Uninterruptible Power Supply) ja sähkönjakeluyksikkö eli PDU-yksikkö (Power Distribution Unit). MDB-yksikkö toimii pääkojeistona, johon jakeluverkon syöttöjännite kytketään. MDB-yksiköltä ohjataan UPS-yksikön akustoja ja vian sattuessa akustot purkautuvat MDB-yksikön katkaisijoiden kautta. PDU-yksikkö jakaa virran pienemmäksi sitä tarvitseville kuormille. MDB-yksikössä voi olla useampia PDU-yksiköitä ja PDU-yksikkö voi jakaa virtaa jopa 40 kuormalle.

### 4.1 Tasajännitteisen sähkönjakelukojeiston rakenne

Tasajänniteverkon syöttöjännite on usein suurempi kuin kuormien käyttämät jännitteet, jolloin jakeluverkon ja kuormien välillä täytyy olla sähkönjakelukojeisto. Jännitteet ovat syöttöpuolella suurempia, koska suurempien jännitteiden avulla saadaan siirrettyä sähköä pidempiä matkoja pienemmillä virroilla. Kuormat voivat olla tasa- tai vaihtojännitteisiä. Jos kuormana on moottori, niin lähdössä täytyy olla myös moottorinsuojakatkaisijan. Kojeiston lähtöjen on oltava tarpeeksi monipuoliset, jotta kojeisto soveltuisi mahdollisimman monipuolisesti asiakkaan vaatimuksiin.

Ilmakatkaisija kytketään kojeiston ja tasajännitteisen jakeluverkon väliin joten pääkatkaisijan on kestettävä tasajänniteverkon jännitteen ja virran arvot. Tasajännitettä voidaan syöttää unipolaarisesti yhdellä vaiheella (kaksijohtimisena) tai bipolaarisesti kahdella vaiheella (kolmijohtimisena). Ilmakatkaisijan valintaan vaikuttavat syöttöpuolen jännitteen ja virran arvot. Syöttöpuolen pääkatkaisija siirtää tasajännitteen kokoomakiskostolle johon myös lähtökatkaisijat on kytketty. Kokoomakiskostolta tasajännite siirtyy edelleen lähtökatkaisijoille.

Syöttöjännitteen ja varsinkin syöttövirran arvot vaikuttavat myös tasajännitekiskojen koon valintaan. Suurilla virran arvoilla tarvitaan kaksi kuparikiskoa vaiheessa ja kiskojen leveys kasvaa virran kasvaessa. Kuparia käytetään yleisesti kiskostojen materiaalina sen hyvän sähkönjohtokyvyn ansiosta. Kiskot voidaan sijoittaa tarpeen vaatiessa kulkemaan kojeiston ylälaidalla tai kojeiston alalaidalla. Suomessa kiskoston vaiheet sijoitetaan yleensä kojeiston ylälaitaan ja nollajohdin alalaitaan.

Lähtöjen katkaisijoille valittavat ominaisuudet riippuvat tasajännitekiskoilta tulevan jännitteen ja virran arvoista sekä tarvittavan ulostulon arvoista. Moottorilähdön, tasajännitteisen lähdön ja vaihtojännitteisen lähdön katkaisijat ovat teknisesti jonkin verran toisistaan eroavia. Lisäksi lähtöjen jännitteen arvo voi vaatia tasajännitemuunnosta eli kokoomakiskostolta tulevan jännitteen arvon muuttamista pienemmäksi. Vaihtojännitekuormille on mahdollista syöttää joko yksi- tai kolmivaiheista vaihtojännitettä. Vaihtojännitekuormien lähdöissä katkaisijan taakse täytyy sijoittaa vaihtosuuntaaja.

#### 4.1.1 Kotelointiluokka

Kojeiston kotelointiluokka ilmaistaan kotelointiluokituskoodilla eli IP-koodilla (Internal Protection). IP-koodi kertoo koteloinnin suojauksen tasosta. Ensimmäinen numero ilmaisee vaarallisten osien kosketussuojauksen, suojauksen pölyltä ja vierailta esineiltä. Ensimmäinen numero kertoo, kuinka hyvin kotelointi rajoittaa tai estää ihmisiä osumasta koteloinnin sisällä olevan kojeiston vaarallisiin osiin kehollaan tai millään työkalulla. Koteloinnin ensimmäinen numero kertoo myös, kuinka hyvin vieraiden esineiden ja pölyn pääseminen koteloinnin sisälle on estetty. Uusien standardien mukaan vierasesineeksi luetaan myös liikkuvat ja elävät kuten pieneliöt. Esimerkiksi pieni muurahainen ei pääse koteloinnin sisälle, jos IP-koteloinnin ensimmäinen tunnusnumero on 3.

Toisen numeron avulla saadaan selville koteloinnin vesisuojauksen laatu. Vesisuojauksen tarve riippuu koteloinnin sijoituksesta. Heikoimmillaan vesisuojausta ei ole, mutta tarpeen tullen voidaan valita kotelointi, joka kestää jopa toistuvaa veteen upottamista. Esimerkiksi sisälle sijoitettavan kojeiston vedensuojauksen ei tarvitse olla kovinkaan kattava, vaan kannattavampaa on valita kotelointi, jossa on riittävän hyvät tuuletusomi-

naisuudet. Taulukosta 1 nähdään IP-koteloinnin kahden ensimmäisen numeron merkitykset. (ABB 2000: 375.)

**Taulukko 1.** IP-koteloinnin tunnuslukujen merkitykset (ABB 2000: 375).

<b>Ensimmäinen tunnusnumero (vieras esine)</b>		<b>Toinen tunnusnumero (vesi)</b>	
0	Suojaamaton	0	Suojaamaton
1	Suojattu halkaisijaltaan $\geq 50$ mm vierailta esineiltä	1	Suojattu pystysuoraan tippuvalta vedeltä
2	Suojattu halkaisijaltaan $\geq 12.5$ mm vierailta esineiltä	2	Suojattu pystysuoraan tippuvalta vedeltä, kun kotelointi on kallistettuna $15^\circ$ saakka
3	Suojattu halkaisijaltaan $\geq 2.5$ mm vierailta esineiltä	3	Suojattu satavalta vedeltä
4	Suojattu halkaisijaltaan $\geq 1.0$ mm vierailta esineiltä	4	Suojattu roiskuvalta vedeltä
5	Pölysuojattu	5	Suojattu vesisuihkulta
6	Pölytiivis	6	Suojattu voimakkaalta vesisuihkulta
		7	Suojattu lyhytaikaisen veteen upottamisen vaikutuksilta
		8	Suojattu jatkuvan veteen upottamisen vaikutuksilta

Kotelointiluokan tunnusnumeroiden lisäksi IP-tunnuksessa on mahdollista ilmoittaa koteloinnin kosketussuojaus tarkemmin lisäkirjaimella. Suojauksen laadun määritelmää voidaan tarkentaa lisäkirjaimella, kun todellinen kosketussuojaus on parempi kuin ensimmäinen numero ilmoittaa. Laitekohtaisissa standardeissa suojauksen laadusta kertova täydentävä tieto voidaan ilmoittaa tunnusnumeroiden ja lisäkirjaimen jälkeen ilmoitettavalla täydennyskirjaimella, joka on nähtävissä taulukosta 2. (ABB 2000: 376.)

**Taulukko 2.** IP-koteloinnin täydentävät kirjaimet (ABB 2000: 376).

Lisäkirjain		Täydennyskirjain	
A	Kosketussuojattu nyrkiltä	H	Suurjännitelaitte
B	Kosketussuojattu sormelta	M	Laitteen vesisuojaus on koestettu laitteen liikuteltavien osien liikkuessa
C	Kosketussuojattu työkalulta	S	Laitteen vesisuojaus on koestettu laitteen liikuteltavien osien ollessa paikoillaan
D	Kosketussuojattu langalta	W	Laite on sopiva käytettäväksi erikseen määritellyissä sääolosuhteissa ja se on varustettu lisäominaisuudella tai -käsittelyllä

Koteloinnin valinta riippuu tilasta, johon kojeisto asennetaan. Koteloinnin valinta on yksinkertaista kosketussuojauksen ja tiiviyn tarpeen mukaan valmiiksi tehdyistä taulukoista, jos tiedetään, minkälaiseen tilaan kojeisto sijoitetaan. Kosketussuojauksen vaatimustaso riippuu paljolti siitä kuinka avonaisella paikalla kojeisto sijaitsee. Mikäli kojeisto on suljetussa tilassa, voidaan käyttää avonaisempaa kotelointiluokitusta. Vaikka avonaisemman koteloinnin tuuletus ja lämmönsiirtokyky onkin parempi kuin tiiviisti suljetun koteloinnin, niin standardin SFS-EN 60439–3 mukaisissa ja muissa suljetuissa ja kuivissa tiloissa olevien kojeistojen suositellaan olevan vähintään IP 20 C mukaisia. Pölytiivistä kotelointia on syytä käyttää esimerkiksi tehtaassa, jossa käsitellään pölyyn-tyvää materiaalia, kuten sahoilla tai louhoksissa. Parhaimmat tuuletusominaisuudet saavutettaisiin avorakenteisella koteloinnilla, mutta avorakenteisen koteloinnin käyttö- ja työturvallisuus on niin heikko, ettei avorakenteista kotelointia sallita Suomessa edes sähkötilassa. Suositusten mukaan muidenkin kuin standardien mukaisten kojeistojen IP käyttöluokka olisi kuivissa sisätiloissa vähintään IP 20 C. (ABB 2000: 375–376.)

Kojeistot on suunniteltu käytettäväksi normaaleissa olosuhteissa. Normaaleissa olostuhteissa IP-koteloinnin sisäasennuksen vaatimukset ovat (ABB 2000: 374):

- Ympäristön lämpötila ei saa ylittää 40° C.

- 24 tunnin keskiarvo ei saa ylittää 35° C.
- Lämpötilan alaraja on - 5° C.
- Ilma on puhdasta eikä suhteellinen kosteus saa olla yli 50 %, kun lämpötila on 40° C.

Ulkoasennuksen vaatimukset normaaleissa olosuhteissa käytettäessä IP-kotelointia ovat (ABB 2000: 374):

- Ympäristön lämpötila ei ylitä 40° C.
- 24 tunnin keskiarvo ei saa ylittää 35° C.
- Lämpötilan alaraja lauhkeassa ilmastossa on - 25° C.
- Lämpötilan alaraja arktisessa ilmastossa on - 50° C.
- Suhteellinen kosteus voi olla 100 % vain korkeintaan 25° C lämpötilassa.

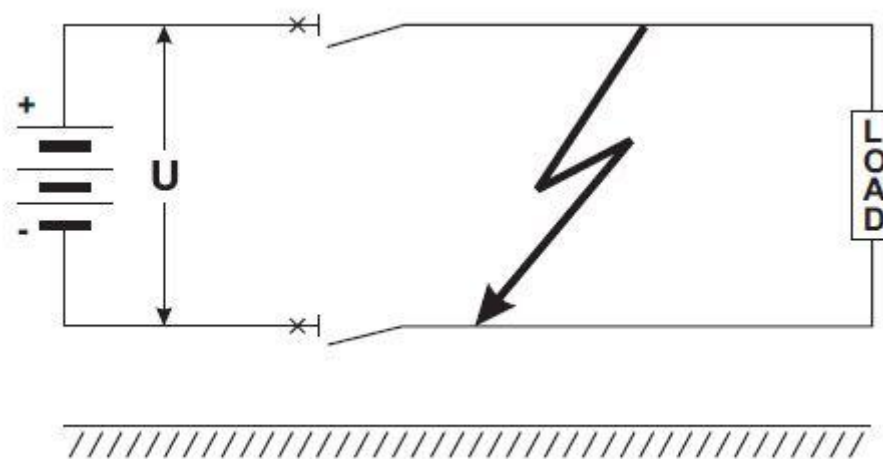
#### 4.1.2 Tasajännitekojeiston maadoitus

Maadoitusten tarkoituksena on (ABB Sace 2011):

- estää vaarallisten kosketusjännitteiden syntymistä vikatapauksissa,
- estää häiriöitä tele- ja elektroniikkajärjestelmissä,
- estää ilmastollisten ylijännitteiden aiheuttamia vaaratilanteita ja vaurioita ja
- mahdollistaa sähköverkon vikavirralla kontrolloitu, luotettava reitti ja varmistaa suojalaitteiden nopea ja selektiivinen toiminta.

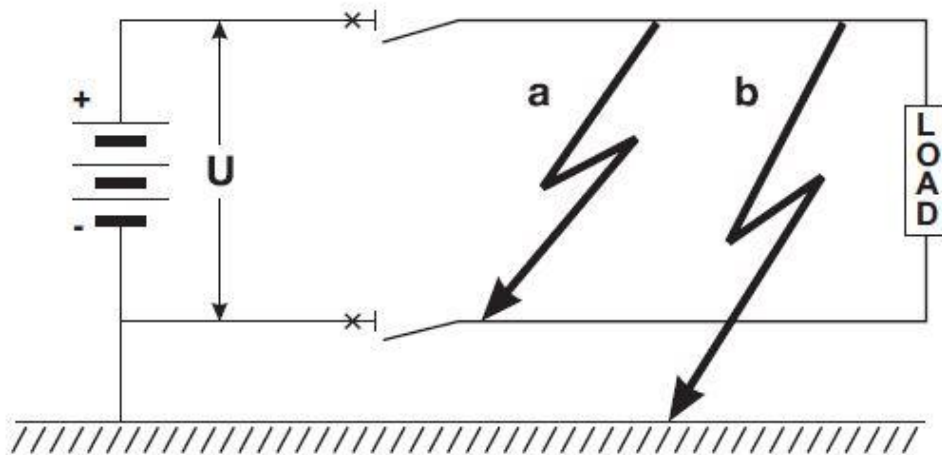
Kojeiston maadoittamisessa voidaan käyttää kolmea eri tapaa. Kojeisto voi olla maasta erotettu eli ”kelluva” järjestelmä, jolloin kojeisto ei ole suoraan maahan yhteydessä.

Maasta erotetussa verkossa vika voi tapahtua ainoastaan vaiheiden välillä. Kun kojeisto ei ole maadoitettu, on suositeltavaa kytkeä molemmat navat katkaisijaan, jotta saadaan sekä miinus että plusnapa katkaistua tarpeen vaatiessa. Kun molemmat navat katkaistaan, niin turvallisuusriski pienenee. Kuvassa 13 nähdään maasta erotettu verkko ja sen ainoa vikapaikka.



**Kuva 13.** Maasta erotettu verkko (ABB Sace 2011).

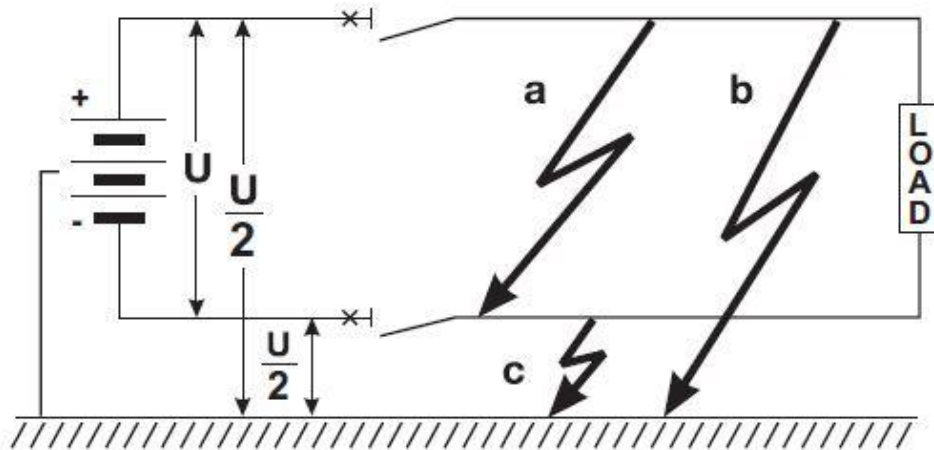
Miinusmaadoitettu verkko tarkoittaa verkon negatiivisen potentiaalin maadoittamista. Miinusmaadoitetussa ja keskipistemaadoitetussa verkossa turvallisuus on parempi kuin maasta erotetussa verkossa, koska niissä verkolla on suora yhteys maapotentiaaliin toisin kuin maasta erotetussa verkossa. Maasta erotetussa verkossa myös kytkentämahdollisuudet ovat periaatteessa rajoitetummat. Kun käytetään miinus- tai keskipistemaadoitettua verkkoa, niin esimerkiksi 3-napaisen katkaisijan kytkennässä voidaan miinusnapa ohittaa katkaisijalta, koska vikatilanteen sattuessa miinus on suoraan yhteydessä maapotentiaaliin. Miinusmaadoitetun verkon haittapuolena on plusnavan ja maapotentiaalin välisen vian mahdollisuus. Koska negatiivinen potentiaali on maadoitettu, niin miinusmaadoitetussa verkossa on enemmän mahdollisia vikapaikkoja kuin maasta erotetussa verkossa. Kuvassa 14 on esitetty miinusmaadoitetun verkon vikapaikat.



**Kuva 14.** Miinusmaadoitetun verkon vikapaikat. Vaiheiden välinen vika ”a” ja plusnavan ja maapotentiaalin välinen vika ”b”. (ABB Sace 2011.)

Keskipistemaadoitusta käytetään esimerkiksi bipolaarisessa kytkennässä. Bipolaarisen verkon suurimpia hyötyjä ovat sen useat kytkentävaihtoehdot, jotka on käyty läpi tässä työssä aiemmin. Keskipistemaadoituksessa on kuitenkin useita mahdollisuuksia vikoihin jotka häiritsevät sähköverkon toimintaa. Maasta erotetun verkon napojenvälisen ja miinusmaadoitetun verkon plusnavan ja maapotentiaalin välisen vian lisäksi keskipistemaadoitetussa verkossa on mahdollisuus miinusnavan ja maapotentiaalin väliseen vikaan. Maadoitustavoista keksipistemaadoitetussa verkossa vikojen mahdollisuudet ovat suurimmat. Jos halutaan vähiten vikapaikkoja, niin kannattaa valita maasta erotettu verkko. Kuvassa 15 on esitetty keskipistemaadoituksen mahdolliset vikapaikat.





**Kuva 15.** Keskipistemaadoituksen vikapaikat (ABB Sace 2011).

#### 4.2 Tasajännitteisen sähkönjakelukojeiston komponentit

Kojeiston komponenttien on täytettävä IEC 61439 standardin mukaiset vaatimukset. Standardin lisäksi komponenttien virta- ja jännitekestoisuudet täytyy olla riittävät korkeat kestääkseen erisuuruisia tasajänniteverkkoja. Komponenttien on kestävä myös tasajänniteverkon oikosulkuvirrat. Mahdollisen vikavirtasuojauksen täytyy toimia alle sekunnin viiveellä, ettei laitteisto vioitu.

Taulukossa 3 nähdään esimerkkejä, kuinka suuri jännitteen täytyy olla, kun siirto tapahtuu tasajännitteisenä, jotta vaihtosuuntauksesta saadaan ulostuloksi joko 230 V<sub>ac</sub> tai 400 V<sub>ac</sub>. Vaihtosuuntaajia voi olla esimerkiksi puoli- tai kokosilta ratkaisuna. Suomessa mahdolliset vaihtojännitteitä käyttävät laitteet ovat nimellisarvoiltaan joko yksivaiheisena 230 V<sub>ac</sub> tai kolmivaiheisena 400 V<sub>ac</sub>. Taulukosta nähdään siirrettävän tasajännitteen suuruus puoli- tai kokosiltavaihtosuuntaajaa käyttäville asiakkaille, 230 V<sub>ac</sub> tai 400 V<sub>ac</sub> tarvetta varten. Mikäli asiakkaalla on kokosiltavaihtosuuntaaja, on tasajännitteenä tarvittava suuruus toteutettavissa esimerkiksi bipolaarisella jakelutopologialla sekä 230 V<sub>ac</sub> että 400 V<sub>ac</sub> tarvittavilla vaihtojännitteen arvoilla. Puolisiltavaihtosuuntaajaa käytettäessä 400 V<sub>ac</sub> vaihtojännite vaatii vähintään 800 V<sub>dc</sub> tasajännitteen suuruutta, mutta bipolaarisen jakelutopologian jännitteet ovat pienemmät, koska bipolaarisella jakelulla napo-

jen ja nollajohtimen välinen jännite on  $\pm 750 V_{dc}$ . Puolisiltavaihtosuuntaajan käyttö ja  $400 V_{ac}$  vaihtovirtajännitteen tarve vaatii unipolaarisen siirtotavan. (Voutilainen 2007: 23.)

**Taulukko 3.** Minimitasajännitteet vaihtosuuntaajan tulonavoille, jotta saadaan  $230 V_{ac}$  tai  $400 V_{ac}$  vaihtosuuntaus (Voutilainen 2007: 23).

Vaihtosuuntaaja	Vaihtosuuntaus 1-vaiheinen $230 V_{ac}$	Vaihtosuuntaus 3-vaiheinen $400 V_{ac}$
Puolisilta	$\geq 650 V_{dc}$	$\geq 800 V_{dc}$
Kokosilta	$\geq 325 V_{dc}$	$\geq 565 V_{dc}$

#### 4.2.1 Syöttökentän ilmakatkaisija

Tasajännitteen jakelukojeiston syöttökentän katkaisijaksi eli pääkatkaisijaksi on tässä työssä esitetty ABB Sace Emax DC ilmakatkaisijoita. Emax DC ilmakatkaisijat ja niiden lisävarusteet ovat IEC 947-, EN 60947-2-1, CEI EN 60947- ja IEC 1 000-standardien mukaisia. Lisäksi ABB Sace Emax ilmakatkaisijat ovat EU:n pienjännitedirektiivin nro 73/23 EEC ja sähkömagneettista yhteensopivuutta koskevan direktiivin 89/336 EEC mukaisia. Vaihtoehtoja on eri jännitteiden ja virran maksimiarvojen lisäksi 3- tai 4-napainen ja kiinteä tai ulosvedettävä malli. (ABB Sace 2011.)

Ilmakatkaisimien kokoja on erilaisia (E1, E2, E3, E4 ja E6). Koko riippuu ilmakatkaisimen virta- ja jänniterajoista. Kuvasta 16 nähdään E4-kokoinen ilmakatkaisijamalli, jonka nimellisvirta  $I_u$  on  $1\,600\text{--}3\,200\text{ A}$  ja nimellisjännite  $U_e$  on  $750\text{--}1\,000\text{ V}$ . Nimellisvirran ja -jännitteen arvot riippuvat napojen määrästä joita on 3–4. (ABB Sace 2011.) E4 koko sopii esimerkiksi bipolaarisesti kytkettyyn tasajänniteverkkoon, mutta sen nimellisjännitteen maksimiarvo ( $1\,000 V_{dc}$ ) ei riitä unipolaariseen sähkönjakeluverkkoon, mikäli verkossa on käytössä maksimijännite ( $1\,500 V_{dc}$ ). ABB SACE Emax H6 on suurin Emax DC-ilmakatkaisijoista ja H6-mallin valinta on oikea, mikäli halutaan suurimmat mahdolliset virta-arvot ( $3\,200\text{--}5\,000\text{ A}$ ). Emax H6-ilmakatkaisija vaatii kuitenkin

suuremman kenttäleveyden kuin H4, joten 3 200–4 000 A virroilla kannattaa käyttää pienempää H4 ilmakatkaisijaa (ABB Sace 2011.)



**Kuva 16.** Sace Emax E4H MS -ilmakatkaisija (ABB 2011a).

Taulukosta 4 nähdään Emax-ilmakatkaisijamallien ominaisarvoja. Taulukosta saadaan E2-, E4- ja E6-ilmakatkaisijamallien virtaraja-arvot, 0,5 sekunnin katkaisuarvot eri tasajännitteellä 3- ja 4-napaisena, katkaisuaika sekä kiinteän ja ulosvedettävän ilmakatkaisijan mitat. Virta-arvon mukaan voidaan valita sopiva ilmakatkaisija kojeiston pääkatkaisijaksi, riippuen syöttöpuolen virran suuruudesta. 0,5 sekunnin katkaisuarvo,  $I_{cw}$ , kertoo kuinka suuren oikosulkuvirran ilmakatkaisija kestää kullakin tasajännitteen arvolla joko 3- tai 4-napaisena kytkentänä. Kuten taulukosta nähdään, ilmakatkaisijan oikosulkukestoisuuden suuruus pienenee, kun syöttöjännitteen arvo kasvaa. Katkaisuaika kertoo kuinka nopeasti ilmakatkaisija aukeaa, kun virta  $I$  ylittää oikosulkuvirran  $I_{cw}$  arvon. Kiinteän ja ulosvedettävän ilmakatkaisijan mitoitus on myös oleellista tietää, jotta voidaan valita sopivat kentät, kun suunnitellaan komponenttien sovitusta kojeistoon. Taulukossa 4 nähtävät katkaisijan fyysiset koot on esitetty 3- ja 4-napaisten Emax-ilmakatkaisijoiden mukaan. Katkaisijoiden korkeus (K) ja syvyys (S) pysyvät samana

jokaisella ilmakatkaisija-mallilla. Ilmakatkaisijan leveys (L) vaihtelee mallin ja napaluvun (3- tai 4-napainen) mukaan, kuten taulukossa on esitetty

**Taulukko 4.** Emax DC ilmakatkaisijamallien ominaisarvoja (ABB Sace 2011).

Malli		E2		E4		E6
Suorituskyky		B	N	S	H	H
$I_u$	(A)	800, 1 000, 1 250, 1 600	1 600	1 600, 2 000, 2 500, 3 200	3 200	3 200, 4 000, 5 000
$I_{cw}$ (0.5 s)						
500 V <sub>dc</sub> (3p)	(kA)	35	50	75	100	100
750 V <sub>dc</sub> (3p)	(kA)	25	25	65	65	65
750 V <sub>dc</sub> (4p)	(kA)	25	40	65	65	65
1 000 V <sub>dc</sub> (4p)	(kA)	25	25	50	65	65
Katkaisuaika, kun $I > I_{cw}$ (max)	(ms)	60	60	60	60	60
Mitat: KxSxL 418x302xL (3p/4p) kiinteä	(mm)	296/386	296/386	566/656	566/656	782/908
Mitat: KxSxL 461x396,5xL (3p/4p) ulosvedettävä	(mm)	324/414	324/414	594/684	594/684	810/936

Ilmakatkaisijan oikosulkuarvoon  $I_{cw}$  vaikuttavat taulukon 4 lisäksi kojeiston maadoitus-tapa. Esimerkiksi E4H3200 ilmakatkaisijan oikosulkuarvo  $I_{cw}$  on 65 kA, kun pääjännite on alle 750 V<sub>dc</sub>, kojeisto on maasta erotettu, ja kytkennässä käytetään 2-napaista sarjaankytkentää (4-napainen katkaisija). (ABB Sace 2011.)

ABB Sace Emax DC-ilmakatkaisijoissa on sisäänrakennettuna suojarele. Releitä on saatavilla kaksi eri vaihtoehtoa vaadittavan suojaustarpeen mukaan. Sace PR122/DC ja

PR123/DC ovat tasajännitekatkaisijan suojarleet. PR122/DC on uusi elektroninen suo-  
jarele Emax DC-malleihin. Kuvasta 17 nähdään PR122/DC-suojarle, jota on helppo  
ohjelmoida kuvan mukaisen lcd-paneelin ja yksinkertaisten painonappien avulla.  
PR122/DC ja PR123/DC ovat ulkoisesti samannäköiset. Suojareleiden erot ovat niiden  
toiminnoissa. PR122/DC-suojarleen toimintoja ovat (ABB Sace 2011: 13):

- ylikuormitussuojaus (L),
- selektiivinen oikosulkusuojaus (S),
- terminen muisti L ja S suojauksille,
- oikosulun pikalaukaisu (I),
- lämpötilan ylityksen tai alituksen suojaus (OT),
- alueen valinta S suojaukselle,
- kuorman ohjaus (K) ja
- käynnistyksen kynnyсарво (Starting threshold).



**Kuva 17.** PR122/DC suojarleen etupaneeli (ABB Sace 2011: 11).

PR123/DC on tasajännitteisen ilmakatkaisijan suojarieleistä monipuolisin. PR123/DC sisältää kattavan suojauksen, jännitteen- ja virran mittauksen sekä miinus että plus nivoista, tiedon tallennuksen ja katkaisimen ohjauksen. Kattavan suojauksen ja mittausominaisuuksien vuoksi PR123/DC-suojariele sopii käytettäväksi missä tahansa tasajänniteverkossa. PR123/DC sisältää samat ominaisuudet kuten PR123/DC, mutta sen lisäksi PR123/DC suojarieleen ominaisuuksiin kuuluu (ABB Sace 2011: 15):

- maasulkusuojaus säädettävällä viiveellä (G)
- napojen epätasapaino (polarity unbalance) (U),
- lämpötilan ylityksen suojaus (OT),
- ylijännite (OV),
- alijännite (UV),
- aktiivinen takateho (RP),
- parametrien päällekkäinasetus (dual setting),
- selektiivinen suojaus S ja G toiminnoille ja
- käynnistyksen kynnyksarvot suojauksille S ja I.

Kytkin on niin sanotusti passiivinen katkaisija, joka katkaistaan manuaalisesti tarpeen vaatiessa. Kytkin ei sisällä suojarieleitä. Suojaus on tehtävä erillisellä laitteistolla. Ilmakatkaisija on aktiivinen vaihtoehto. Ilmakatkaisijan suojarieleet aukaisevat katkaisijan, kun virrat nousevat liian suuriksi. Molemmat vaihtoehdot siis sulkevat piirin syötöstä, mutta sen lisäksi ilmakatkaisijassa on edellä mainittu sisäänrakennettu suojariele ylikuormitusta varten.

Ilmakatkaisijan valinnassa täytyy ottaa huomioon tasajänniteverkon virta- ja jänniterajat. Ilmakatkaisijan napojen määrä (3 tai 4) vaikuttaa myös virran ja jännitteen suuruuteen. Lisäksi täytyy valita, halutaanko kiinteä vai ulosvedettävä malli. Kiinteän mallin hyötyinä ovat esimerkiksi pienemmät häviöt kuin ulosvedettävässä mallissa, mutta

ulosvedettävän mallin huolto ja vaihtaminen uuteen katkaisijaan on yksinkertaisempaa. Katkaisijan sisäänmenojen sijainti riippuu kaapeloinnista. Katkaisija on mahdollista asentaa kojeistoon, johon kaapelointi tulee joko ylhäältä tai alhaalta. (ABB Sace 2011.)

Taulukosta 5 nähdään Emax DC E2-, E4- ja E6-ilmakatkaisijoiden tehohäviöt, kun virta  $I$  on 1 250 – 5 000 A. Taulukossa on vertailtu ilmakatkaisijoiden häviöitä PR122/DC- ja PR123/DC-suojareleillä, kiinteänä tai ulosvedettävänä ilmakatkaisijana ja 3- tai 4-napaisena eri virran  $I$  arvoilla. Kiinteän mallin tehohäviöt ovat aina ulosvedettävää mallia pienemmät, koska ulosvedettävässä mallissa tarvitaan liitântäkohtaan pistokkeet sekä katkaisijaan että kiskoon. Koska ulosvedettävän mallin liitännässä on enemmän ”materiaalia”, ulosvedettävän mallin liitännän kautta tehoa muuttuu enemmän lämmöksi kuin kiinteän mallin liitännöistä. Ulosvedettävä malli on kuitenkin helpompi huoltaa ja se saadaan erotettua kunnolla näkyvällä ilmavälillä kiskoon nähden, joten ulosvedettävä malli on myös turvallisempi.

Taulukon 5 vertailussa käy ilmi myös napaluvun vaikutus häviöihin. 4-napaisen kytkimen tehohäviöt ovat noin 10–30 % suuremmat kuin 3-napaisen kytkimen, mutta napaluvusta johtuvan tehohäviön välisen eron suuruuteen vaikuttaa myös virran  $I$  suuruus. Kun virta  $I$  kasvaa, niin napaluvusta johtuvien tehohäviöiden ero kasvaa.

Napaluvun, katkaisimen mallin, asennusversion ja virran suuruuden lisäksi tehohäviöiden määrään vaikuttaa myös suojarelemallin valinta. Yleisluontoisemman PR122/DC-suojarelelen valinnalla saavutetaan pienemmät tehohäviöt kuin kattavammalla PR123/DC-suojareleellä. Kun verrataan ainoastaan suojareleiden vaikutusta, tehohäviöt ovat noin 10–54 %. Kun käytetään E6-mallia ja virrat ovat jopa 5 000 A, niin PR122/DC-suojarelettä käytettäessä tehohäviöt ovat 600 W ja PR123/DC-suojarelettä käytettäessä 1 100W, joten PR123/DC aiheuttaa melkein kaksikertaiset tehohäviöt.

Taulukosta 5 voidaan myös päätellä, että E6-ilmakatkaisija kannattaa valita tehohäviöiden perusteella, jos virran suuruus on vähintään 3 200 A. E4-ilmakatkaisijamallin tehohäviöt ovat prosentuaalisesti huomattavasti suurempia verrattuna E6-malliin, kun virran arvo on 3 200 A. Tehohäviöiden suuruuteen voi vaikuttaa virran arvo, joka on E4-

mallin virtakestoisuuden ylärajoilla, joten E4-malli on kovemmassa rasituksessa kuin E6-malli. 3 200 A on E6-mallin alaraja, joten pienempien tehohäviöiden lisäksi E6-mallia käyttämällä myös virtarajan nostamiseen on mahdollisuus tarpeen vaatiessa. Myös eliniän kannalta on kannattavampaa valita suurempi pääkatkaisija, koska pienemmällä rasituksella toimiva pääkatkaisija voi myös kestää pidemmän ajan.

Pienemmillä virran arvoilla, 1 250–1 600 A käytössä on E2-katkaisija. E3-katkaisija ei ole vertailussa mukana, koska taloudellisesti E3-katkaisija häviää pienemmillä virroilla E2-katkaisijalle ja suuremmilla virroilla kannattaa valita E4-katkaisija.

ABB:n käyttämän IP-kotelointiluokan lämmönkestoisuus on noin 800 W jokaista kenttää kohti, kun kentän leveys on 600 mm. Lämmönkestoisuus vaikuttaa valittavaan pääkatkaisijaan. Vaikka E6 katkaisijan tehohäviöt voivat nousta yli 1 kW, eivät korkeat tehohäviöt ole esteenä E6 katkaisijan käytölle, koska suurempi katkaisija on myös leveämpi. Leveämpi katkaisija vaatii leveämmän kentän, jolloin myös kentän lämmönkestoisuus kasvaa.



**Taulukko 5.** Emax DC E2-, E4- ja E6-ilmakatkaisijoiden tehohäviöt (W) eri kokoonpanoilla (ABB Sace 2011: 8).

Katkaisijan tekniset tiedot				<i>I</i> (A)						
Malli	Suojarele	Versio	Napa-luku	1250	1600	2000	2500	3200	4000	5000
E2	PR122/DC	F	3	94	136					
		W	3	152	232					
		F	4	117	174					
		W	4	195	302					
	PR123/DC	F	3	176	156					
		W	3	176	252					
		F	4	219	195					
		W	4	219	323					
E4	PR122/DC	F	3			120	188	271		
		W	3			195	305	463		
		F	4			136	234	348		
		W	4			236	391	604		
	PR123/DC	F	3			150	234	348		
		W	3			225	352	504		
		F	4			180	281	389		
		W	4			280	438	645		
E6	PR122/DC	F	3					154	304	475
		W	3					276	496	775
		F	4					246	384	600
		W	4					410	640	1000
	PR123/DC	F	3					236	368	575
		W	3					358	560	875
		F	4					287	448	700
		W	4					451	704	1100

Ilmakatkaisijan valinnassa täytyy siis ottaa huomioon:

- jakeluverkon tyyppi,
- syöttövirta ( $I_u$ ),
- syöttöjännite ( $U_e$ ),
- oikosulkuvirta ( $I_{cu}$ ),
- napaluku,
- katkaisijan malli, kiinteä (F) tai ulosvedettävä (W),
- syöttökaapeloinnin sijoitus (ylhäältä tai alhaalta) ja
- tarvittava relesuojaus.

#### 4.2.2 Kompaktikatkaisija

Sekä tasa- että vaihtojännitteiset syötöt kuormille voidaan toteuttaa ABB Sace Tmax-katkaisijalla eli niin sanotulla kompaktikatkaisijalla. Vaihtojännitteiselle lähdölle tarvitaan lisäksi invertteri eli vaihtosuuntaaja, jolla saadaan kompaktikatkaisijalta lähtevä tasajännite vaihtosuunnattua yksi- tai kolmivaiheiseksi vaihtojännitteeksi vaihtojännitekuormille. Lähtökatkaisijan jälkeen voidaan tarvita myös ”hätä seis”-tyyppinen katkaisu, joka saadaan lisäämällä katkaisijan taakse kontaktori.

Tmax-kompaktikatkaisijan koko määräytyy kojeistolta tulevan virran ja jännitteen mukaan. Kompaktikatkaisijalle tuleva jännite  $U$  on pääjännitteen suuruinen, mutta virta  $I$  riippuu katkaisijoiden määrästä, koska virta jakautuu katkaisijoille. Katkaisijalta edelleen kuormille lähtevän virran ja jännitteen suuruudet riippuvat asiakkaan tarpeista. Pienjännitepuolella Tmax-kompaktikatkaisijamallien (T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7) virtarajat ovat 0–1 600 A, riippuen kompaktinkatkaisijan mallista. Mikäli jakeluverkossa käytetään 1 000 V<sub>dc</sub> jännitettä, täytyy Tmax-kompaktikatkaisijan koko soveltua myös

kyseiselle jännitealueelle. T4-, T5- ja T6-mallisia Tmax-kompaktikatkaisijoita voidaan käyttää 1 000 V<sub>dc</sub> jännitteeseen saakka. (ABB 2010: 2/61.)

Kuvassa 18 on esitetty ABB Sace Tmax T5 -malli. Kyseisen mallin virtarajat ovat 3-napaisena 400 A ja 4-napaisena 630 A, kun jännite  $U_e$  on 750 V<sub>dc</sub>. 4-napaisen T5-kompaktikatkaisijan virtarajat ovat 320–630 A. Pienemmillä virroilla voidaan käyttää Tmax T4 (250 A) -kompaktikatkaisijaa ja suuremmille virroille valitaan Tmax T6 -kompaktikatkaisija (630 ja 800 A). Kyseiset arvot ovat käytössä sekä 3- että 4-napaiselle mallille. (ABB 2011a: 2/61.)



**Kuva 18.** ABB Sace Tmax T5 -kompaktikatkaisijan etupaneeli (ABB 2011b).

Kun verrataan 3- ja 4-napaisia katkaisijoita, niin 3-napaisen kompaktikatkaisijan käytöllä saavutetaan edullisemmat kustannukset ja asennusleveys on kapeampi, joten koko kojeiston kokonaisleveys saadaan tiivistettyä kapeammaksi. Tasajännitteinen 3-napainen sarjaankytkentä voidaan suorittaa kytkemällä plusnapa sarjaan kaikkien kolmen navan läpi ja miinusnapa kytketään suoraan kuormaan ohittamalla katkaisija.

Jos miinusnapaa ei katkaista ollenkaan, niin maadoitus kannattaa suorittaa miinusmaadoituksella. Jos halutaan kelluva kojeisto, eli maasta erotettu verkko, niin 3-napaisessa kytkennässä kannattaa plusnapa kytkeä katkaisijan kahteen napaan ja miinusnapa yhteen. Jos miinusnapaa ei ole maadoitettu, niin miinusnapa on myös turvallisuuden kannalta hyvä katkaista.

Taulukosta 6 nähdään eri Tmax-kompaktikatkaisijoiden arvoja. Taulukosta 6 nähtävät virta-arvot ovat kuitenkin viittellisiä arvoja. Kojetoissa useiden kompaktikatkaisijoiden virran kestoisuus on pienempi kuin taulukossa ilmoitettu. Virran todellinen arvo riippuu myös kytkentätavasta. Esimerkiksi suoraan koskettimiin kytkettävän ”plug-in” T5 (630 A) -kompaktikatkaisijan todellinen virtaraja on 570 A.

Kuten taulukosta 6 nähdään, oikosulkuvirran kestoisuudet vaihtelevat katkaisijasta ja jännitteestä  $U_e$  riippuen. T4-, T5- ja T6-kompaktikatkaisijoilla on samat oikosulkuvirran kestot 250 V<sub>dc</sub> jännitteellä 2-napaisena sarjaan kytkentänä. Ainoastaan T6-kompaktikatkaisijan suurin oikosulkuvirran kesto on pienempi verrattuna T4- ja T5-kompaktikatkaisijaan. Tasajännitteiseen sähkönjakelukojeistoon valittavat Tmax-kompaktikatkaisijat voidaan valita taulukon 6 mukaan, kun tiedetään virtarajat ja kojeiston oikosulkuarvot. Yleensä kojeiston oikosulkuarvoksi  $I_{cu}$  valitaan 50 kA ja katkaisijat voidaan mitoittaa kojeiston mukaan. Katkaisijan oikosulkuarvon täytyy olla vähintään sama kuin kojeistolla.

**Taulukko 6.** Tmax kompaktikatkaisijoiden ominaisarvoja (ABB 2011b).

Malli		T2	T4	T5	T6
Virtaraja (3p, 4p)	(A)	160	250, 320	400, 630	630, 800 ja 1 000
Syötettävä virta (min.-max.)	(A)	1,6–160	20–320	320–630	630–1 000
Navat		3 tai 4	3 tai 4	3 tai 4	3 tai 4
$U_e$	(V)	500	750	750	750
$I_{cu}$ , kun 250 V <sub>dc</sub> , 2-napainen sarjaankytkentä	(kA)	36, 50, 70, 85	36, 50, 70, 100, 150	36, 50, 70, 100, 150	36, 50, 70, 100
$I_{cu}$ , kun 500 V <sub>dc</sub> , 2-napainen sarjaankytkentä, kun kaksi plus ja yksi minusnapa	(kA)		25, 36, 50, 70, 100	25, 36, 50, 70, 100	20, 35, 50, 65
$I_{cu}$ , kun 750 V <sub>dc</sub> 3-napainen sarjaankytkentä	(kA)		16, 25, 36, 50, 70	16, 25, 36, 50, 70	16, 20, 36, 50
Mitat KxSxL 4-napaisena	(mm)	130 x 70 x 120	205 x 103,5 x 140	205 x 103,5 x 184	268 tai 406 x 103,5 x 280
Leveys 3-napaisena (KxS sama kuin 4-napaisena)	(mm)	90	105	105	140

ABB Sace Tmax -kompaktikatkaisijat ja katkaisijoiden lisävarusteet ovat kansainvälisen IEC 60947–2 standardin, pienjännitedirektiivin 73/23 EEC ja sähkömagneettista yhteensopivuutta koskevan 89/336 EEC direktiivin mukaisia. Tmax-kompaktikatkaisijoiden laatuvaatimukset ovat kansainvälisen ISO 9001 -standardin, vastaavan eurooppalaisen EN ISO 9001 -standardin ja italialaisen UNI EN ISO 9001 -standardin vaatimusten mukaisia. Tmax-kompaktikatkaisijat täyttävät myös laivoihin asennettaville laitteille tarvittavat vaatimukset. (ABB 2011b.)

Kompaktikatkaisijat sisältävät myös oman suojausalueen, jonka avulla kompaktikatkaisijan takana olevat kuormat saadaan kytkettyä automaattisesti pois muusta verkosta mah-

dollisen vian tai ylikuormituksen sattuessa. T4-, T5- ja T6-kompaktikatkaisijoiden suo-  
jareleinä voidaan käyttää yhteensopivia termomagneettisia (TMA), magneettisia (MA)  
tai elektronisia suoja-releitä (esim. PR222DS). Käytettävät releet ovat rakenteeltaan niin  
yksinkertaisia, että komponenttien loppukäyttäjä voi vaihtaa reletyyppiä tarpeen mu-  
kaan itsekin. Jos releitä vaihdetaan itse, vastuu asennuksesta on loppukäyttäjällä. Relei-  
den helpon vaihdettavuuden ansiosta katkaisijoiden joustavuus lisääntyy ja järjestelmän  
kustannukset pienenevät. (ABB 2011b.)

Kompaktikatkaisijoiden määrään yhdessä kentässä vaikuttaa myös niiden häviöistä joh-  
tuvan lämmön määrä, kuten kävi ilmi myös pääkatkaisijan osalta. Pääkatkaisijoita tarvi-  
taan jakelukojeistossa vain yksi, mutta kompaktikatkaisijoita tarvitaan useampia. Ken-  
tän lämmönkestoisuuden takia kompaktikatkaisijoiden määrä täytyy valita tarkasti, ettei  
yhteen kenttään sijoiteta liikaa katkaisijoita. IP 31 -kotelossa yhden 600 mm leveän ken-  
tän lämmönkestoisuus on noin 800 W, joten suurempia tehohäviöitä aiheuttavia kom-  
paktikatkaisijoita voidaan asentaa yhteen kenttään vähemmän.

#### 4.2.3 Moottorilähtö

ABB Sace Tmax -kompaktikatkaisija sopii myös moottorilähdöksi. Moottorilähtö eroaa  
normaalista lähtökatkaisijasta siten, että moottorilähtö tarvitsee käynnistyksessä suu-  
remman virtapiikin, jonka jälkeen virran arvo laskee ja tasoittuu. Normaalisissa jakelussa  
virran arvo pysyy vakiona koko ajan. Moottorilähtö vaatii myös kontaktorin, jolla ohja-  
taan katkaisijan toimintaa esimerkiksi erillisellä painonapilla. Normaaleihin kuormiin  
verrattuna moottorilähtö vaatii myös moottorinsuojakatkaisijan.

Teollisuudessa käytetään suurimmaksi osaksi vaihtovirralla toimivia moottoreita, jolloin  
tasajännitteiseen kokoomakiskostoon kytketyn Tmax-kompaktikatkaisijan takana täytyy  
olla vaihtosuuntaaja tai taajuusmuuttaja. Tasajännite pitää vaihtosuunnata vaihtovirta-  
moottorille sopivaksi vaihtojännitteeksi ja taajuusmuuttajalla saadaan myös ohjattua  
vaihtovirtamoottoria. Vaihtosuuntaus on hyvä sijoittaa sähkönjakelukojeistoon, jotta  
saavutetaan valmis kokonaisratkaisu ja helpotetaan asiakkaan laitteiden kytkemistä ko-  
jeistoon. Kun kojeistossa on valmiina vaihtosuuntaajia tarvittava määrä, moottoreiden

kytkeminen valmiisiin liitännöihin on yksinkertaisempaa. Toinen mahdollisuus olisi siirtää sähkö tasajännitteisenä jakelukojeistolta moottorin lähelle ja sijoittaa vaihtosuuntaaja moottorin läheisyyteen. Erillisellä vaihtosuuntaajalla kokonaisratkaisu kuitenkin kärsisi ja näin ollen asiakkaan näkökulmasta monimutkaistaisi kojeiston käyttöä.

#### 4.2.4 Smissline-johdonsuojakatkaisija

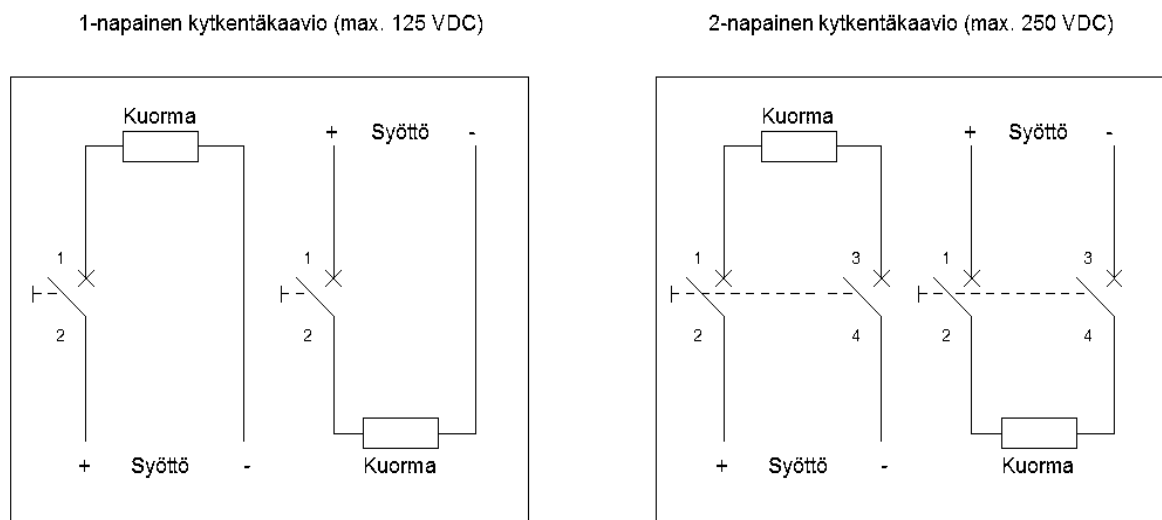
Tasajännitesovelluksissa Smissline-johdonsuojakatkaisija on 1-, 2-, tai 4-napainen. Kuvassa 19 esitetyllä Smissline-johdonsuojakatkaisijalla voidaan syöttää tasajännitekuormia, pienillä 2–63 A virroilla. Smissline johdonsuojakatkaisijan vaihtaminen ja huolto on helppoa, koska Smissline on suoraan koskettimiin asennettava ”plug-in” -mallinen johdonsuojakatkaisija. Mikäli yksittäiseen johdonsuojakatkaisijan takana olevaan kuorman tulee vikoja, johdonsuojakatkaisija on helppo irroittaa PDU-yksiköstä. Kun viallista kuormaa syöttävä johdonsuojakatkaisija on irti PDU-yksiköstä, niin kuorma on jännitteetön eikä vaikuta myöskään muiden kuormien toimintaan tai sähkönsyöttöön. Kuvassa 20 nähtävä johdonsuojakatkaisija on kytketty vaihtojännitteisissä ATK-keskuksissa käytettävään PDU<sup>pro</sup>-yksikköön. Kuvassa nähdään myös apukoskettimet, joilla johdonsuojakatkaisija voidaan yhdistää mittalaitteistoon.



**Kuva 19.** Kojestoon kytketty 3-napainen Smissline -johdonsuojakatkaisija.

Smissline johdonsuojakatkaisijan oikosulun katkaisukyky  $I_{cn}$  on vaihtojännitteellä 6–10 kA suuruinen ja standardin EN 60898-1 mukainen. Tasajännitteisillä kuormilla oikosulun katkaisukyky on standardin EN 60947 mukainen ja ulottuu 6–50 kA suurisiin oikosulkuvirtoihin saakka. Jos oikosulun katkaisukyky  $I_{cn}$  on 50 kA, niin nimellisvirta  $I_N$  voi olla korkeintaan 2 A. Tässä työssä käytettävien Smissline-johdonsuojakatkaisijoiden nimellisvirrat ovat suurempia kuin 2 A, jolloin oikosulun katkaisukyky  $I_{cn}$  on 6 kA.

Tasajännitekäytössä johdonsuojakatkaisija voidaan kytkeä kahdella tavalla. Kuvassa 21 nähdään yksi- ja kaksinapainen johdonsuojakatkaisijan kytkentä. Yksinapaisella kytkennällä suurin jännitteenarvo on 125 V<sub>dc</sub> ja kaksinapaisella kytkennällä 250 V<sub>dc</sub>. Kuten kuvasta 20 nähdään, niin kytkennässä ei ole merkitystä, onko syöttö ylhäältä vai alhaalta. Tasajännitekojeistokäytössä kaksinapainen kytkentä on parempi, koska kaksinapaisella kytkennällä saadaan suuremmat jännitteet käyttöön, jolloin saadaan siirrettyä suurempaa tehoa kuormille. (ABB Low Voltage Products 2011: 1/11.)

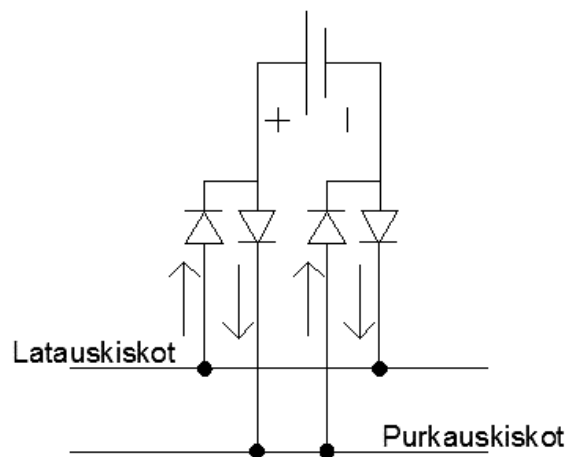


**Kuva 20.** Smissline-johdonsuojakatkaisijan kytkentäkaaviot tasajännitteellä 1- ja 2-napaisena.



#### 4.2.5 Diodi

Kojeistossa käytettävien diodien tehtävänä on ohjata virtaa oikeaan suuntaan. Akkujen latauksessa diodit rajoittavat virran kulkusuuntaa niin ettei virta ohjaudu latauskiskoston kautta takaisin syöttöpuolelle, vaan virta kulkee syöttökiskoston kautta PDU-yksiköille ja edelleen kuormille. Kuvassa 21 nähdään diodien kytkeminen kiskoston ja akustoon, sekä virran kulkusuunta. Diodit ohjaavat virtaa akuille latauskiskostosta plusnavan kautta miinusnapaan, kun akkuja ladataan. Akkujen purkautuessa diodit suuntaavat akuilta purkautuvan virran plusnavasta miinusnapaan. Diodien koko on yleensä pienempi latauspuolella, koska akut voivat olla ylläpitävässä latauksessa useista kuukaudesta jopa vuosiin, ennen kuin vian sattuessa akkuja joudutaan purkamaan. Purkautuvan virran puolella olevat diodit ovat suurempia, koska akuilta purkautuva virta täytyy olla riittävän suuri virtaa tarvitseville kuormille.



**Kuva 21.** Diodien tehtävä tasajännitekojeistossa.

Suunniteltavan tasajännitekojeiston latauspuolelle sopivaksi diodiksi on valittu Semikronin valmistama Semipack 2 -diodimoduli. Latauspuolen virta on pieni, jolloin Semipack 2 soveltuu ohjaamaan latauspuolen virtaa. Kuten kuvasta 22 nähdään, niin Semipack 2 -diodimodulin virta-arvo on 162 A, joten latausvirta ei ylitä diodin virtakestoisuutta.



**Kuva 22.** Latauspuolella käytettävä Semipack 2 diodi.

Purkautuva virta on suurempi kuin latauspuolen virta, joten purkautuvan puolen diodiksi valittiin Semipack 6 -diodimoduli. Kuvassa 23 on Semipack 6 -diodimoduli, jonka  $I_{\max}$  on 1 200 A, joten suurin purkausvirta 630 A ei vahingoita diodia. Koska diodin maksimivirta on purkautuvaa virtaa paljon pienempi, niin diodi ei myöskään kuumene liikaa.



**Kuva 23.** Akkujen purkupuolella käytettävä Semipack 6 diodi.

Taulukossa 7 on sekä lataus- että purkauspuolen diodien ominaisarvoja. Taulukosta nähdään nimellisvirran  $I_N$  arvot, suurimman jatkuvan virran  $I_{FAV}$  arvot, 100 celciusas-

teen lämpötilassa olevan maksimivirran  $I_{FAV}$  arvot, suurin estojännitteen kesto ja kojeistossa olevien diodien maksimivirtojen arvot  $I_{maxoutkojeisto}$ . Kojeistossa olevien diodien maksimi-arvot on testattu Sveitsin ABB Low Voltage Systems -osastolla.

**Taulukko 7.** Kojeistossa käytettävät diodit (Semikron 2011).

<b>Diodimalli:</b>		<b>Semipack 6</b>	<b>Semipack 2</b>
Mallinumero:		SKKE 1200/22 H4	SKKE 162/12
$I_N$	(A)	1 200	162
$I_{FAV}$	(A)	1 387	208
$I_{FAV} T=100^\circ$	(A)	1 180	160
$U_{rrm}$	(V)	2 200	1 200
$I_{maxoutkojeisto}$	(A)	630	50
Part number		07278650	07892010

#### 4.2.6 Kiskoston rakenne ja kuormitus

Yleisin käytetty materiaali kiskostojen valmistuksessa on nykyisin kupari. Kuparin johdavuus, terminen kestoisuus ja hinta-laatu -suhde on hyvä. Kokoomakiskon leveyteen ja kiskojen rinnakkaiseen määrään vaikuttaa syöttökentän virran suuruus. Kuparikiskon kuormitettavuudessa hyvänä ohjesääntönä on käyttää arvoa 2 A jokaista  $\text{mm}^2$  kohden. Esimerkiksi 100 mm x 10 mm kokoisen kuparikiskon kuormitettavuus saadaan laskettua yhtälöstä

$$I_{max} = P \cdot L \cdot 2 \text{ A} = 10 \cdot 100 \cdot 2 \text{ A} = 2\,000 \text{ A}, \quad (3)$$

missä  $I_{max}$  on kuparikiskon suurin virtakestoisuus,  $P$  on kuparikiskon paksuus ja  $L$  on kuparikiskon leveys. 100 mm x 10 mm kokoisen kuparikiskon suurin virtakestoisuus on siis 2 000 A.

Kuparikiskoja voidaan asentaa rinnakkain, jotta saadaan kasvatettua kiskon virtakestoisuutta. Jos kuparikiskolla halutaan siirtää 4 000 A virtaa, niin voidaan laittaa kaksi edellä laskettua kuparikiskoa rinnakkain. Kiskojen väliin täytyy jättää 10 mm väli, jotta kupari ei kuumene liikaa.

Käytettävien kuparikiskojen paksuus on yleensä 10 mm, mutta leveydessä on valittavana eri kokoja, kuten 40 mm, 50 mm, 60 mm, 80 mm, 100 mm ja 120 mm. Kapeammat kuparikiskot ovat keveämpiä, mutta niiden virtakestoisuus on leveitä kiskoja pienempi. Taulukossa 8 nähdään eri levyisten kuparikiskojen virrankestoisuus, kun kiskoja on rinnakkain 1–4. Taulukon kuparikiskot ovat kirkkaita kiskoja, eli niitä ei ole maalattu. Taulukon virran arvot ovat tasajännitteellä mitattuja arvoja.

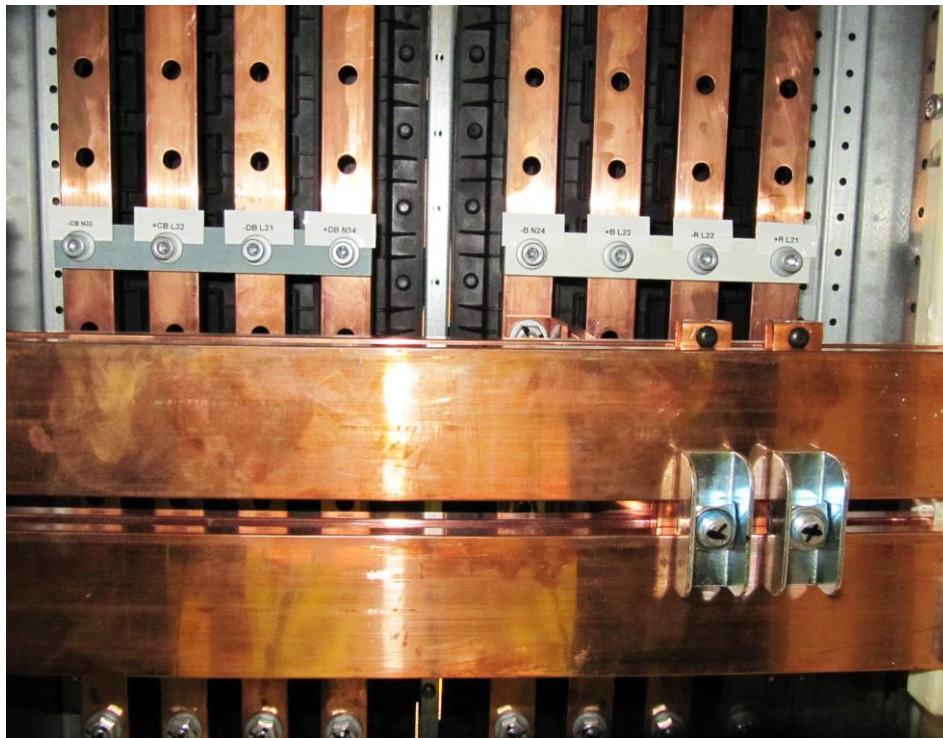
Taulukon 8 arvot pätevät, kun ympäristön lämpötila on 35 °C ja suurin sallittu kuparikiskon lämpenemä on 30 °C. ABB LVS -osastolla kuparikiskon suurin lämpenemä on kuitenkin todettu koestusten perusteella olevan 95 °C, joten käytännössä kojeiston kokoomakiskoina voidaan käyttää suurempia, edellisen kaavan mukaan laskettavia arvoja.

Taulukossa olevat arvot ovat kuitenkin suuntaa antavia, jotta voitaisiin arvioida tarvittavan kuparikiskon kokoa. Yhden kiskon käyttöä tarvitaan pystykiskoilla, jotka on kiinnitetty vaakatasossa kulkeviin kokoomakiskoihin. Pystykiskojen avulla katkaisijat ja kokoomakiskot saadaan kytkettyä toisiinsa. Pienjännitekojeissa on yleensä käytössä 2 x 40 mm x 10 mm tai 4 x 40 mm x 10 mm kuparikiskot, joiden suurin virran arvo on jopa 2 000 A ja 4 000 A.

**Taulukko 8.** Litteäkuparin kuormitusvirta TTT-käskikirjan mukaisilla teoreettisilla arvoilla (ABB 2000).

a x b (mm)	Pinta- ala (mm <sup>2</sup> )	Paino (kg/m)	Aine	Jatkuva virta (A)			
				Yksi kisko	Kaksi kiskoa	Kolme kiskoa	Neljä kiskoa
40 x 10	399	3,55	F 25	770	1 400	2 000	
50 x 10	499	4,44	F 25	960	1 700	2 500	
60 x 10	599	5,33	F 25	1 100	2 000	2 800	3 600
80 x 10	799	7,11	F 25	1 450	2 600	3 700	4 800
100 x 10	999	8,89	F 25	1 800	3 200	4 500	5 800
120 x 10	1200	10,7	F 25	2 150	3 700	5 200	6 700

Kuvassa 24 nähdään kojeiston kirkkaat kuparikiskot. Vaakatasossa menevä 4 x 40 mm x 10 mm kuparikisko on kojeiston kokoomakiskoston pluskisko. Takana olevat pystykiskot ovat katkaisijoita varten olevia kiskoja. Niiden avulla pääkiskot ja katkaisijat kytketään yhteen. Pystysuoran kuparikiskon nimellisvirta  $I_N$  on 750–900 A. Kuvan kokoomakiskosto on kiinnitetty sitä vastaavaan pystykiskoon. Pystykiskoon voidaan asentaa esimerkiksi lähtökatkaisija. Virta siirtyy pääkiskostolta pystykiskoa pitkin katkaisijaan.



**Kuva 24.** Kokoomakiskoston plussakisko ja pystyskiskosto W-kentässä.

Kun kiskoja valitaan nimellisvirran mukaan, on otettava huomioon (ABB 2000: 525):

- ympäristön lämpötila,
- sallittu lämpenemä,
- käytettävä metallilaji (Yleensä käytössä on kupari),
- kiskon pinnan säteilykerroin,
- kunkin vaiheen osakiskojen sijainti toisiinsa nähden,
- ympäröivän ilman nopeus kiskoon nähden, eli tuuletus ja
- virta, joka on tässä työssä tasavirta.

Ympäristön lämpötila-arvoina käytetään rajoja, jossa ympäristön lämpötilan 24 tunnin keskiarvo saa olla enintään  $35^{\circ}\text{C}$  ja kuparikiskon suurin lämpenemä saa olla  $95^{\circ}\text{C}$ . Kuparikiskon suurin lämpötila voi siis olla  $35^{\circ}\text{C} + 95^{\circ}\text{C}$ , eli  $130^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.2.7 UPS-järjestelmän akuston rakenne

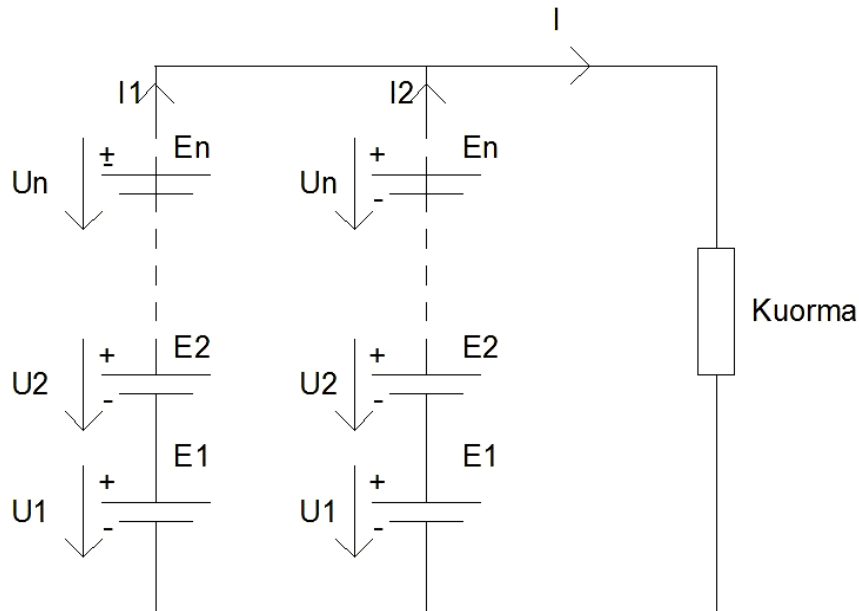
UPS-järjestelmällä tarkoitetaan staattista laitetta jonka pääasiallisena tarkoituksena on turvata keskeytymätön sähkönsyöttö kriittisille kuormille. Yleensä UPS-järjestelmissä on tasasuuntaus, akusto ja vaihtosuuntaus, mutta tasajännitteisissä ratkaisuissa ei tarvita vaihtosuuntausta akuston jälkeen. Ohjaus toteutetaan esimerkiksi diodeilla, jotka päästävät virtaa läpi vain yhteen suuntaan. Kun pääsyöttö katkeaa, niin akut alkavat automaattisesti syöttämään kuormia. (ABB 2000: 92.)

Tasajännitteisten ATK-keskuksien keskeytymättömän sähkönsyötön (UPS) akustoina käytetään suurimmaksi osaksi lyijyakkuja. Alle 500 kVA:n kokoisissa UPS-yksiköissä käytössä on yleensä venttiilisäätöiset lyijyakut (VRLA, Valve Regulated Lead-acid). Lyijyaku on vanha keksintö, mutta sen käytöllä on paljon etuja muihin akkuteknologioihin nähden. VRLA-akkuja on käytetty erilaisissa UPS-järjestelmissä jo 20 vuoden ajan. (American Power Conversion 2003.)

Tasajännitekojeiston akkujen purkautumisten väli saattaa olla useita kuukausia, jolloin lyijyakut soveltuvat UPS-järjestelmän käyttöön parhaiten, koska niiden itse purkautuminen on pienempää kuin muilla akkuteknologioilla. Venttiilisäätöisten lyijyakkujen suurimpia hyötyjä muihin lyijyakkuihin verrattuna ovat edulliset asennus- ja huoltokulut, akkujen energiatiheys ja käytön turvallisuus. VRLA-akkujen elinikä riippuu suurimmaksi osaksi akkujen käyttötavasta. Jos akkuja käytetään oikein ja huolehditaan, ettei akkuja ylliladata, niin akkujen käyttöikä pitenee huomattavasti. Akkujen huoltoikä kertoo kuinka kauan kestää ennen kuin akun varausteho on 80 % sen alkuperäisestä varaustehosta. Akkuja saatetaan kuitenkin käyttää, kunnes varausteho on vain 50 % alkuperäisestä varaustehosta. (American Power Conversion 2003.)

Kuvasta 25 nähdään akkujen sarjaankytkentä UPS-järjestelmässä. Akustolta purkautuva jännite  $U$  saadaan, kun lasketaan yhden sarjaankytkettyjen akkujen jännitteet yhteen. Kaikilla rinnankytketyillä akkurivistöillä on sama jännite  $U$ , joten rinnankytkentöjen määrä ei vaikuta jännitteeseen. Akustolta purkautuva virta  $I$  saadaan, kun lasketaan rin-

nankytkettyjen akkusarjojen haaravirrat  $I_1$  ja  $I_2$  yhteen. Sarjaankytkettyjen akkujen määrä riippuu siis latausjännitteestä  $U$  ja yhden akun koko riippuu tarvittavasta virrasta  $I$ .



**Kuva 25.** UPS-järjestelmän akuston periaatekuva yhdellä akkujen sarjaan kytkennällä.

Akkujen latausjännite  $U_{\text{charge}}$  on noin 14 V, koska latausjännitteen täytyy olla korkeampi kuin akun jännite joka on 12 V. Kun tiedetään latauskiskon jännite  $U$ , niin voidaan laskea yhden UPS-järjestelmän akkujen määrä yhtälöllä

$$\frac{U}{U_{\text{charge}}} = \frac{380 \text{ V}}{14 \text{ V}} \approx 27 \text{ akkua}, \quad (4)$$

missä jännitteen  $U$  arvona on käytetty 380 V<sub>dc</sub>, koska tulevaisuudessa on mahdollista käyttää tasajännitesovelluksissa jopa kyseistä jännitteen suuruutta. (Rajagopalan ym. 2010.) Yhden akun latausjännite saadaan laskettua, kun tiedetään tarvittavien akkujen määrä. Latausjännite saadaan laskettua yhtälöstä

$$\frac{U}{\text{akkujen määrä}} = \frac{380 \text{ V}}{27} = 14,07 \text{ V}, \quad (5)$$

missä  $U$  on latauskiskon jännite.



Esimerkkilaskennassa yhteen sarjaankytkentään tarvitaan 27 akkua, jolloin saadaan varastoitua latausjännitettä  $U$  vastaava jännitteen arvo. Jos UPS-järjestelmän purkausaikaa halutaan pidentää, niin voidaan kytkeä rinnan useampi kuvan 25 mukainen akkujen sarjaankytkentä. Kun kaksi sarjaankytkentää on kytketty rinnan, saadaan UPS-järjestelmän purkausaika tuplattua. Yleisesti kuitenkin UPS-järjestelmän toiminta-aika on 5–30 minuuttia, minkä aikana generaattori saadaan kytkettyä kojeiston kautta kuormille tai kuormat saadaan sammutettua hallitusti. UPS-järjestelmän tarvittava toiminta-aika riippuu järjestelmän laitteiden sähköntarpeesta ja esimerkiksi siitä onko UPS-järjestelmään suunniteltu generaattorin käyttöä. Mikäli ATK-laitteista vähiten tärkeät kuormat sammutetaan, niin UPS-järjestelmän toiminta-aikaa saadaan pidennettyä tarpeen mukaan. Jos varakäyntiaikaa halutaan kasvattaa jopa useisiin tunteihin, niin kannattaa harkita generaattorin käyttämistä, koska UPS-järjestelmän akuston koko kasvaa huomattavasti toiminta-ajan pidentyessä. (Ylinen 2010.)

Akkua valittaessa täytyy ottaa huomioon akkujen C-arvo, mikäli akussa sellainen ilmoitetaan. C-arvo kertoo kuinka nopeasti akun voi purkaa ja kuinka suuren latausvirran akku kestää. C-arvon yksikkö on 1/h. Jos 100 Ah akun latauksen C-arvo on esimerkiksi 10C, niin akun purkautumisen nopein aika saadaan

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{10 \frac{1}{h}} = \frac{h}{10} = \frac{60 \text{ min}}{10} = 6 \text{ min} \quad (14)$$

Suurimmaksi purkausvirraksi, jonka akku hetkellisesti kestää, saadaan

$$10C \left[ \frac{1}{h} \right] \cdot 100 \text{ Ah} = 1\,000 \text{ A} \quad (15)$$

jolloin 10 C-arvolla oleva 100 Ah akku kestäisi hetkellisesti purettuna 1 000 A virran. (Ripatti 2011: 7–8.)

## 5 TASAJÄNNITTEISEN SÄHKÖNJAKELUKOJEISTON SUUNNITTELU

Tasajännitteisen sähkönjakelukojeiston suunnittelun haasteina ovat sopivien katkaisijoiden, kiskostojen, koteloinnin ja muiden tarvittavien komponenttien valinta erisuuruisille tasavirroille. Suunnittelussa täytyy ottaa huomioon tasajännitteen, -virran ja oikosulkuvirran suuruudet niin ettei kojeiston katkaisijat tai kojeistoon liitetyt kuormat vaurioidu mahdollisten vikojen aikana. Kuparikiskojen lämpötilat eivät saa nousta liian korkeiksi, joten virrat eivät saa olla myöskään kiskojen virtakestoisuutta korkeampia. Suunnitteluvaiheessa tavoitteena on suunnitella sekä syöttökenttä että lähtökenttä, joissa on pääkatkaisija, oikean suuruiset kokooma- ja latauskiskostot sekä lähtökentän katkaisijat. Virran voimakkuuden mukaan täytyy valita myös oikea kotelointi ja kotelon kenttien leveydet. Koteloinnin valintaan vaikuttaa myös kojeiston sijoitus. Sijoitus on yleensä erilisessä huoneessa jonne ei pääse ulkopuolisia eikä huoneessa ole pölyyntyvää materiaalia, kuten esimerkiksi tehtaiden halleissa.

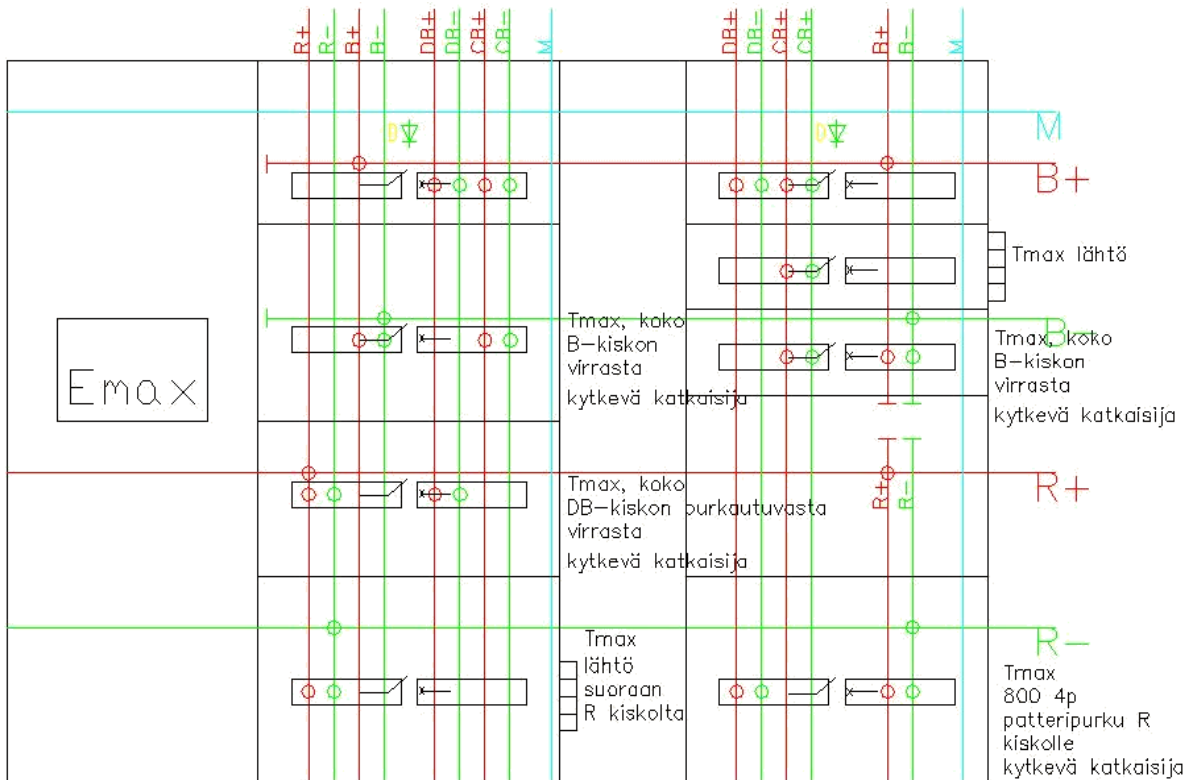
### 5.1 MDB-yksikkö

Suunniteltavan sähkönjakelukojeiston pääjakelukeskuksena toimii MDB-yksikkö (Main Distribution Board). MDB sisältää pääkatkaisijan, pienempiä kompaktikatkaisijoita, akustojen virtaa ohjaavia diodeja, kokoomakiskoston, latauskiskoston ja pystykiskostot. Kojestoon tulee kaksi eri vaakakiskostoa. Pääkokoomakiskosto syöttää kuormia suoraan kojeistoon tulevalle tasavirralla. Latauskiskostolle syötettävä virta on pääkiskoston virtaa pienempi ja latauskiskoston tehtävänä on syöttää virtaa akuille. Akut muodostavat tasajännitteisen UPS-yksikön eli keskeytymättömän sähkönsyötön. Syöttöpuolen vian sattuessa akut purkavat jännitettä kuormille, kunnes vika saadaan korjattua, tai toinen varaenergianlähde kytkettyä kojeistoon. Suunnitellussa MDB-yksikköön tulevien syöttövirtojen suuruudet ovat 2 000 A, 3 200 A ja 5 000 A.

Kuvassa 26 nähdään Auto Cad-ohjelmalla suunniteltu MDB-yksikkö kiskostotasolla, kun käytetään W-kenttää, ja katkaisijoiden kytkentä kiskoihin. Vaakatasossa olevat kiskot ovat kokoomakiskosto, latauskiskosto ja keskipistekisko eli M-kisko (Midpoint).

Kokoomakiskosto (R+ ja R-) on kytketty Emax-pääkatkaisijaan, joka erottaa kokoomakiskoston jakeluverkon kaapeloinnista. Latauskiskosto (B+ ja B-) kulkevee kokoomakiskoston yläpuolella ja erotetaan kuvan 26 mukaisesti Tmax-kompaktikatkaisijalla syöttöpuolen kaapeloinnista. M-kiskoa käytetään keskipisteenä, jos syöttö on toteutettu bipolaarisesti. Unipolaarisessa kytkennässä M-kiskoa ei tarvita. Vaakatasossa oleva kokoomakiskosto kytketään myös pystykiskostoon, joihin katkaisijat voidaan kytkeä. Esimerkiksi latauskiskosto on kytketty Tmax kompaktikatkaisijan kautta pystykiskostoon (CB+ ja CB-). Akuilta tuleva purkaukiskosto (DB+ ja DB-) on kytketty Tmax-kompaktikatkaisijan kautta takaisin kokoomakiskostoon. Kyseiset katkaisijat ovat kytkeviä (coupling) katkaisijoita, jotka toimivat katkaisijoina esimerkiksi kahden eri kiskoston välillä. Kun molemmat katkaisijat aukaistaan, niin akut saadaan kokonaan erotettua kojeistosta esimerkiksi huollon ajaksi. Latauskiskoston ja akuston välinen katkaisija on kiinni, jotta akut latautuvat. Vian tai sähkökatkoksen sattuessa purkaukiskoston ja kokoomakiskoston välinen katkaisija suljetaan, jolloin akusto pääsee purkautumaan kuormille.

Ensimmäisessä kentässä eli niin sanotussa syöttökentässä on Emax-ilmakatkaisija, jonka koko valitaan jakeluverkolta tulevan syöttövirran mukaan. Toisessa kentässä (lähtökenttä) alimpana oleva katkaisija on lähtökatkaisijana toimiva Tmax-kompaktikatkaisija joka on kytketty kokoomakiskostoon. Lähtökatkaisijalta virta siirtyy edelleen PDU-yksikölle. Kolmannessa kentässä on lataus akuille, purku akuilta ja katkaisijan kautta purkautuvan syöttö kokoomakiskostolle. Kolmatta kenttää voidaan käyttää, mikäli yhdestä akustosta purkautuva virta ei riitä yhteen lähtöön kytkettyyn kuormaan. Jos virta ei riitä, niin kolmannen kentän avulla saadaan ylimääräisestä akustosta lisävirtaa, jolloin kojeistossa on enemmän akustoja kuin lähtökenttiä ja PDU-yksiköitä.

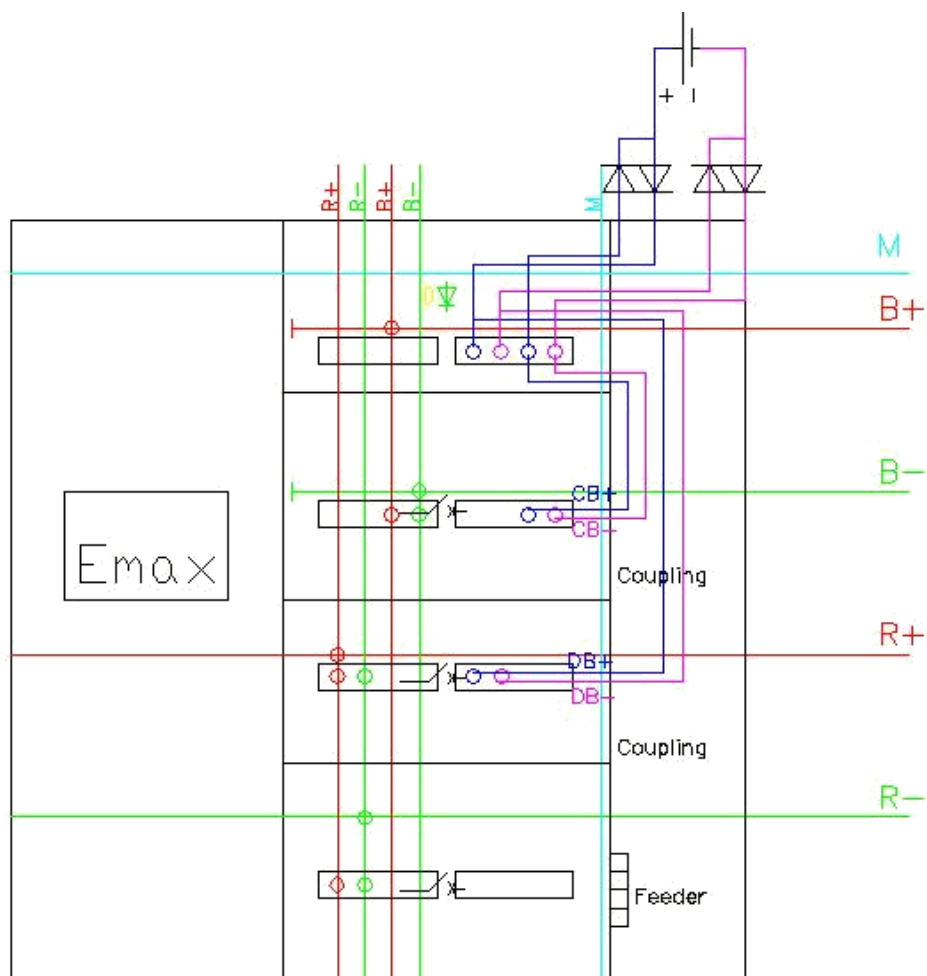


**Kuva 26.** MDB-yksikön kiskostot ja kytkennät, kun käytössä on W-kenttä.

Suunniteltavaan kojeistoon päätettiin käyttää F-kenttää. F-kentän pystykiskojen virrankestoisuus on parempi kuin W-kentällä. W-kentästä poiketen F-kenttään ei mahdu kahdeksaa pystykiskoa, kuten kuvassa 27 W-kenttään on suunniteltu. Latauspystykiskot (CB+ ja CB-) ja purkauspystykiskot (DB+ ja DB-) voidaan korvata kytkemällä sekä katkaisijat että diodit kaapeloimalla navat toisiinsa. Kaapelointi kulkee kuvan 27 mukaisesti kaapelikuilun kautta. Kuvasta nähdään kytkentä katkaisijoilta diodeille ja edelleen diodeilta lataus- ja purkukytkenä akustolle. Myös lataus- ja purkukytkenä kulkevat kaapelikuilua pitkin. Kuvan 28 lähtökentässä on yksi akusto ja yksi kompaktikatkaisija lähtönä PDU-yksikölle. Lähtökenttiä rakennetaan rinnan niin monta kuin kojeistossa on käytössä PDU-yksiköitä. Tässä työssä suunniteltavaa tasajännitteistä sähkönjakelu-kojeistoa voidaan syöttää esimerkiksi 3 200 A virralla, jolloin kojeistoon voidaan rakentaa esimerkiksi viisi kuvan 27 mukaista lähtökenttää.

ABB:n Sveitsissä tekemän testin mukaan diodit kestävät 630 A virtaa. Akustolta purkautuva virta kulkee diodien kautta, joten maksimivirta  $I_{\max}$  on 630 A. PDU-yksikön

nimellisvirta  $I_N$  on mitoitettu 800 A suuriseksi, mutta virta  $I$  on 630 A. Koska akuilta purkautuvan virran ja lähdön nimellisvirran arvot ovat yhtäsuuret, niin vian sattuessa yksi akusto riittää kattamaan yhden PDU-yksikön tarvitseman virran. Kun yhtä lähtökenttää kohden tarvitaan yksi akusto, niin kuvassa 26 esitettyä lataus-purku -kenttää ei tarvita.



**Kuva 27.** MDB-yksikön kiskosto, kun käytössä on F-kenttä. Diodien suunnittelu ulkopuolella.

Kenttäleveydet riippuvat katkaisijoiden leveyksistä. Kenttien leveydet ovat 400 mm, 600 mm, 800 mm, 1 000 mm ja 1 200 mm. Kentän leveydeksi valitaan katkaisijan leveyttä seuraava suurempi kentänleveys. Kentän sovitepalat vievät kentästä tilaa 50 mm, joten mitoituksessa on otettava huomioon, että katkaisija on vähintään sovitepalojen le-

veyden verran kentänleveyttä kapeampi. Tarvittavien kaapelikuilujen leveydet ovat yleensä 200 mm ja 400 mm. Kaapelikuilun leveyteen vaikuttaa suurimmaksi osaksi kuilua pitkin asennettavien kaapeleiden määrä.

Kuvassa 28 on suunniteltu MDB-yksikön kenttien ja kaapelikuilujen leveydet ja korkeudet, kun käytetään F-kenttää. Lisäksi kuvasta nähdään katkaisijoiden sijoitus ja kytkennät kiskostoihin. MDB-yksikön komponentit on valittu syöttövirran (3 200 A) ja latauskiskoston virran (45 A akustoa kohden) mukaan. Syöttö on suunniteltu tulemaan E4H 3 200 DC -pääkatkaisijalle ylhäältä kokoomakiskoston kulkiessa alhaalla, jolloin kaapelointi onnistuu kytkemällä plus- ja miinusnavat sarjaan kuvan 28 mukaisella kytkennällä. Kyseisellä sarjaankytkennällä kaapelointi saadaan jatkumaan sujuvasti kojeiston alalaidassa kulkevalle pääkokoomakiskostolle.

Akkujen latauskiskoston syöttökaapelit on suunniteltu tulemaan oikeanpuoleisen kaapelikuilun alakautta, jolloin kaapelit kytketään suoraan pystykiskoihin. Kaapeleille on suunniteltu 200 mm korkea tila, kuten kuvasta 28 nähdään. Virta kulkee pystykiskoja pitkin T4 320 A -kompaktikatkaisijan ja virtaa ohjaavien diodien kautta ladattaville akuille. Kompaktikatkaisijoiden kytkennässä käytetään kuvan mukaista sarjaan kytkentää, jossa plusnapa katkaistaan kahdella avausvälillä ja miinusnapa yhdellä. Kyseistä kytkentätapaa käyttämällä piiriin saadaan yhteensä kolme avausväliä, joka lisää turvallisuutta kahteen avausväliin verrattuna.

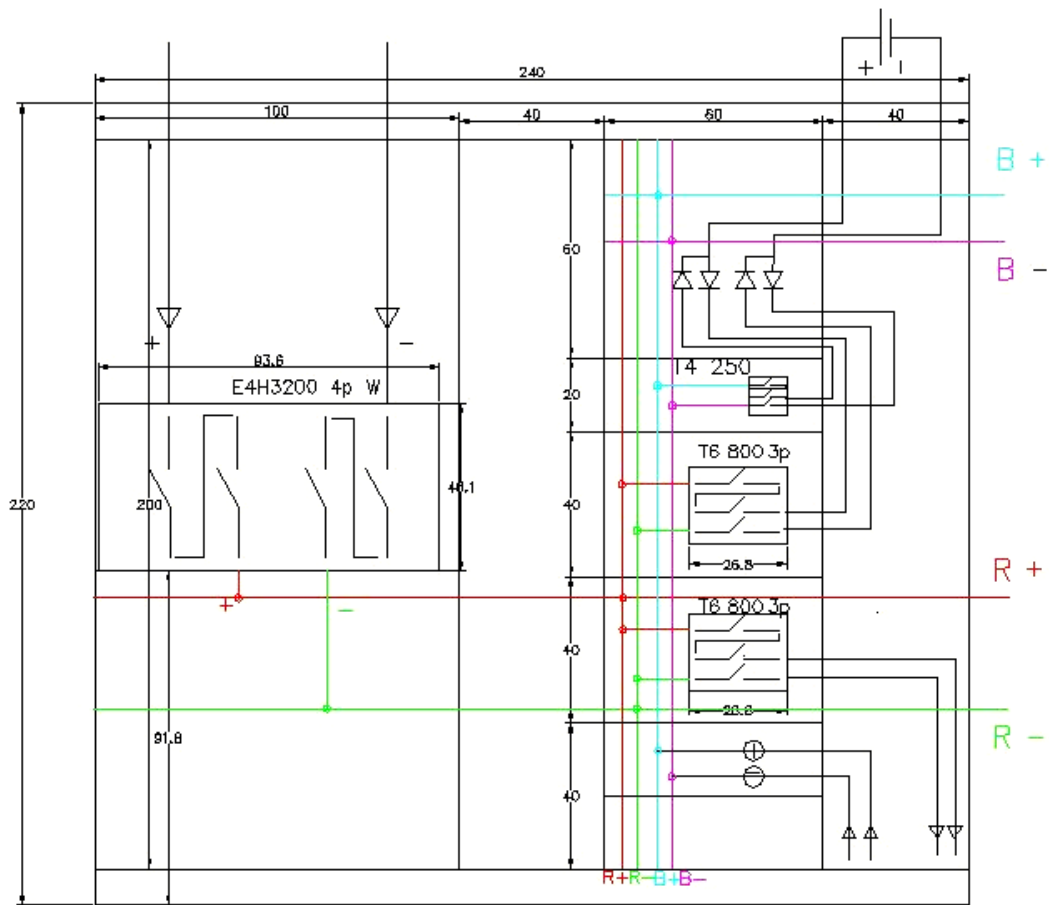
Kuvan 28 katkaisijat on sijoitettu siten, että katkaisijan tuuletuksen ja kotelon väliin jää 100 mm ilmaväli. Jos katkaisija on asennettu liian lähelle koteloa, katkaisijan ja kotelon välille voi syntyä valokaari, kun katkaisija aukeaa. T6 800 -kompaktikatkaisijat voidaan sijoittaa kuvan mukaisesti kyljelleen. Jos T6 800 -kompaktikatkaisija sijoitetaan pystyyn, yhdelle katkaisijalle tarvitaan joko 800 mm tai 1 000 mm korkuinen tila. Yhden kentän kokonaiskorkeus on 2 000 mm, joten tarvittavia katkaisijoita olisi mahdoton sijoittaa samaan kenttään. T6 800 kompaktikatkaisijan ollessa kyljellään, katkaisija tarvitsee vähintään 300 mm korkean tilan, mutta suunnittelussa otettiin huomioon, ettei katkaisijoita kannata sijoittaa liian tiivistä, koska kenttään jää ylimääräistä tilaa korkeussuunnassa. 400 mm korkeaan tilaan sijoitetuilla T6 800 -kompaktikatkaisijoilla on

enemmän tuuletustilaa, joten katkaisijat eivät kuumene yhtä paljon kuin tiiviimmässä ratkaisussa. Vaikka kyljelleen sijoitetut T6 800 -kompaktikatkaisijat tarvitsevatkin leveämmän (600 mm) kentän kuin pystyssä olevat kompaktikatkaisijat (400 mm), niin kokonaisratkaisuna leveämpi kenttä on parempi. Leveämpään kenttään saadaan mahtumaan myös tarvittavat pystykiskot.

Kuten kuvasta 28 nähdään, alimmainen T6 800 -kompaktikatkaisija on sijoitettu 400 mm korkeuteen maasta, koska käyttöä varten maan tasolla olevat kojeet eivät ole järkevä ratkaisu. Kyseisen katkaisijan manuaalinen katkaisukytkin tulee olemaan n. 500 mm korkeudella maasta, jolloin manuaalinen käyttö ja huoltotyöt ovat ergonomisesti helpompi tehdä.

Ylimpänä oleva T4 250 kompaktikatkaisija tarvitsee 200 mm korkean tilan, jolloin kaikkien katkaisijoiden yhteiskorkeus maavara mukaan lukien on 1 300 mm. Korkeimmalle lähtökentässä on asennettu diodiyksikkö joka suuntaa lataus- ja purkausvirrat oikeisiin suuntiin. Diodiyksikkö sijoitetaan 600 mm korkeaan tilaan. T4 250- ja ylempi T6 800 -kompaktikatkaisija kytketään kaapeloinnilla kaapelikuilun kautta diodiyksikölle ja diodiyksiköltä kaapelointi jatkuu kaapelikuilua pitkin akustolle.

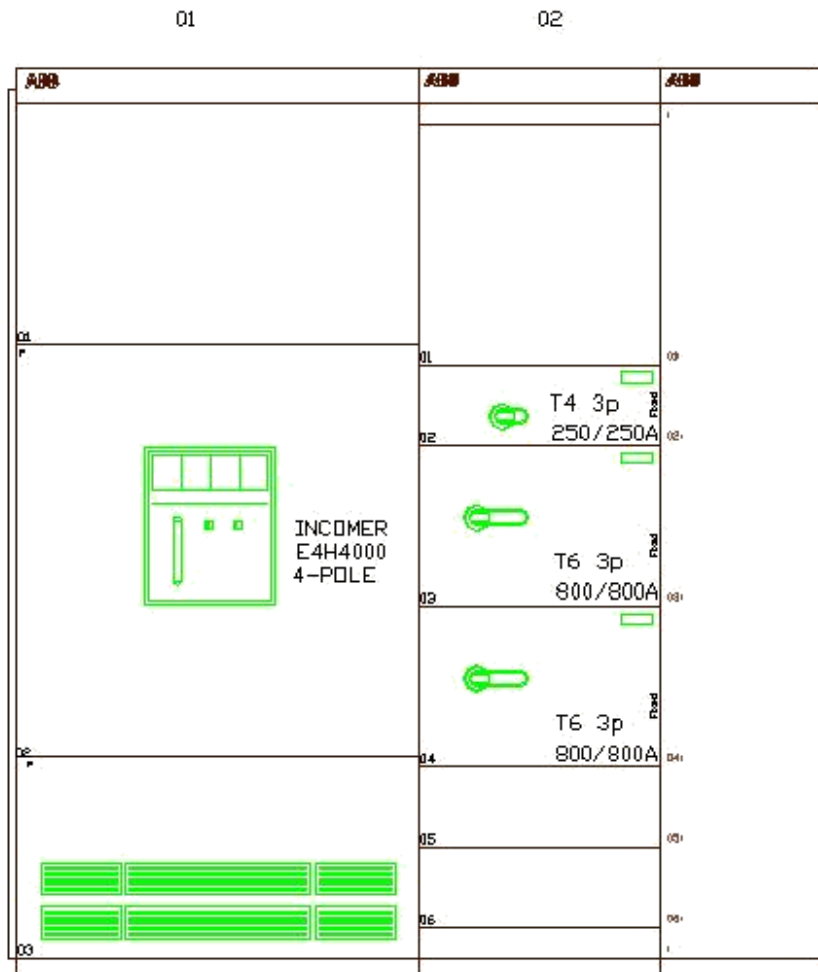
Katkaisijoiden alapuolelle on jätetty tyhjä 200 mm korkea tila. Joissain tapauksissa asiakas saattaa vaatia kojeiston kuljetusta ja säilytystä konteissa. Täydessä korkeudessaan (2 200 mm) oleva kojeisto ei mahdu kontteihin. Tarpeen vaatiessa tyhjä tila voidaan poistaa, jolloin saadaan niin sanottu konttikojeisto. Kun kojeiston kokonaiskorkeutta vähennetään tyhjän tilan verran, niin kojeistosta saadaan tehtyä konttiin mahtuva kojeisto. Tyhjän tilan poistamisesta ei aiheudu komponenttien uudelleensijoittelua, koska kojeistot on suunniteltu valmiiksi omiin tiloihinsa ja ne on sijoitettu tyhjän tilan yläpuolelle.



**Kuva 28.** Kojeiston katkaisijoiden kytkentä kiskostoon F-kentässä.

Kuvassa 29 nähdään ABB:n CPL-ohjelmalla suunniteltu MDB-yksikön sijoituskuva etupuolelta, kun kojeiston ovet ovat kiinni. Kuvassa nähdään katkaisijoiden paikat kojeistossa oikeassa mittakaavassa. Kuvassa on syöttökenttä, jonka alapuolella on tuuletusritilät. Lähtökenttiä kuvassa on vain yksi, mutta syöttövirran ja kuormien suuruudesta riippuen lähtökenttiä tulee kojeistoon useampia.





**Kuva 29.** CPL-ohjelmistolla suunniteltu MDB-kojeiston etukuva.

## 5.2 PDU-yksikkö

MDB-yksikön lisäksi tasajännitteen jakelukojeistossa on myös erillinen sähkönsyöttö-yksikkö (PDU, Power Distribution Unit). MDB-yksiköltä syötettävä sähkö jaetaan katkaisijoilla PDU-yksikössä pienemmäksi virraksi ja edelleen kuormille. MDB-yksikön lähtökatkaisija ja PDU-yksikön etukojeena oleva kompaktikatkaisija on mitoitettu kestämään 800 A suuruinen virta joka on PDU-yksikön virran nimellisarvo  $I_N$ . Nimellisarvosta poiketen todellinen PDU-yksikön maximivirta  $I$  on 630 A. MDB-yksikön nimellivirran  $I_N$  ollessa esimerkiksi 3 200 A ( $I = 3\,000$  A), voidaan MDB-yksikköön yhdis-

tää esimerkiksi viisi PDU-yksikköä. Kun PDU-yksiköitä kytketään MDB-yksikköön viisi kappaletta, saadaan yhden PDU-yksikön nimellisvirraksi  $I_N$  laskettua

$$I_{N\ PDU} = \frac{I_{N\ MDB}}{PDU\ kpl} = \frac{3\ 200A}{5} = 640\ A, \quad (16)$$

ja todelliseksi maksimivirraksi  $I$  saadaan laskettua

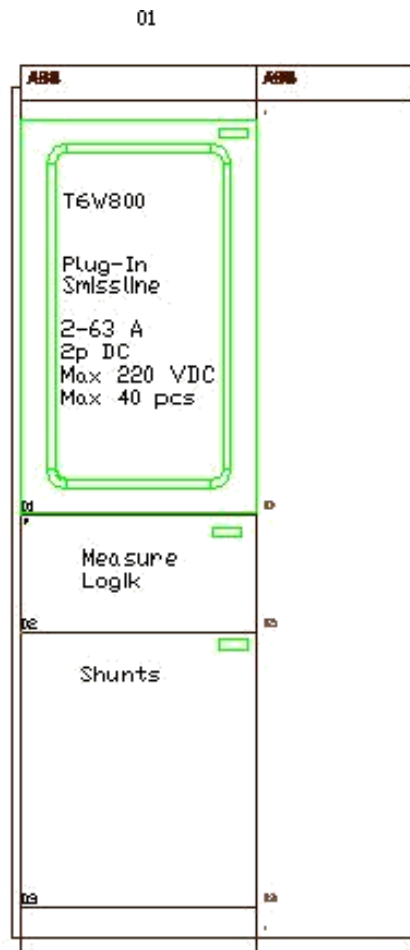
$$I_{PDU} = \frac{I_{MDB}}{PDU\ kpl} = \frac{3\ 000A}{5} = 600\ A, \quad (17)$$

joiden perusteella voidaan mitoittaa PDU-yksikköön sopivat kuormat.

PDU-yksikön etukojeistona on T6 800 -kompaktikatkaisija, jolle MDB-yksikkö syöttää virtaa. T6 800 katkaisijalta virta siirtyy edelleen kiskostoa pitkin pienemmille Smissline-johdonsuojakatkaisijoille. PDU-yksikkö voi sisältää korkeintaan 40 Smissline-lähtöä, jotka syöttävät edelleen kuormia. PDU-yksikön lähtöjen määrä riippuu johdonsuojakatkaisijoiden ja kuormien suuruudesta. Katkaisijoiden määrää suunniteltaessa kokonaisvirta ei saa ylittää PDU-yksikölle syötettävän virran määrää.

PDU-yksikön nimellisjännite on  $U_N = 250\ V_{dc}$ , kun käytetään kaksinapaisia johdonsuojakatkaisijoita. Käytettävän jännitteen arvo täytyy olla kuitenkin jännitettä  $U_N$  pienempi, koska liian suurella jännitteellä on riski, että katkaisija aukeaa. Jos jännite mitoitetaan liian korkeaksi, niin mahdolliset jännitepiikit saattavat aukaista katkaisijan liian helposti. Jos PDU-yksikön jännite on pienempi kuin MDB-yksikön pääjännite ja akuilta purkautuva jännite, niin ennen PDU-yksikköä tarvitaan joko DC-DC -muunninta tai MDB-yksikön pääjännite joudutaan pienentämään PDU-yksikölle sopivaan  $220\ V_{dc}$  arvoon. DC-DC -muuntimella saadaan pääjännite pienennettyä PDU-yksikölle sopivaksi, mutta katkoja lisää komponenttikustannuksia ja tehohäviöitä. Parempi ratkaisu on siis mitoittaa pääjännite arvoon jonka kojeiston jokainen komponentti kestää, kuten tässä työssä on tehty.

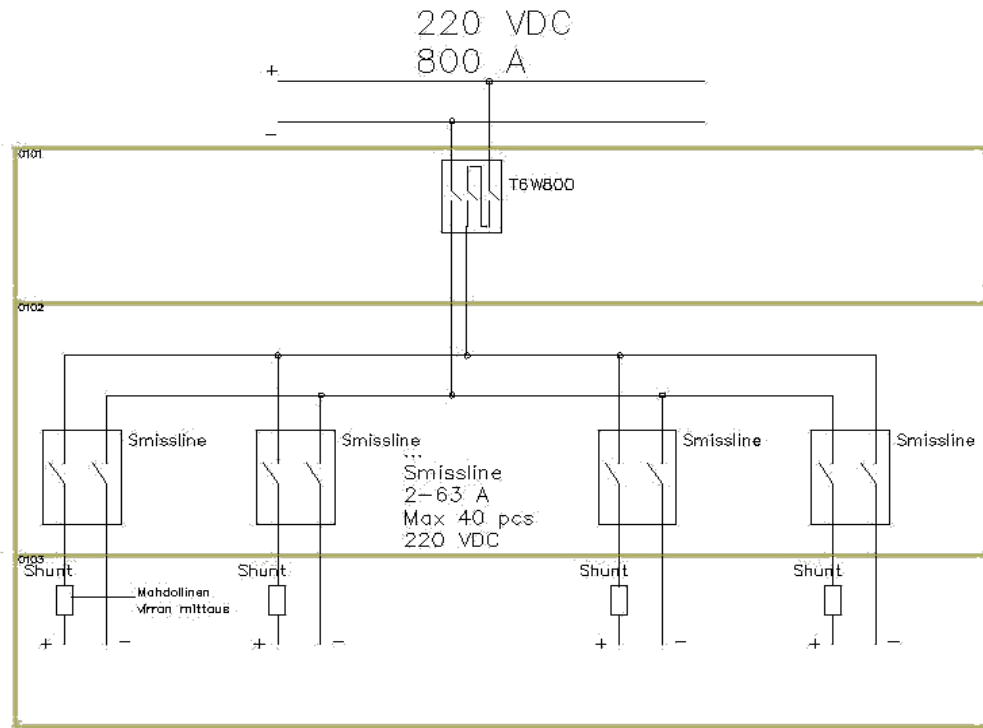
Kuvassa 30 nähdään CPL-ohjelmistolla suunniteltu PDU-yksikön sijoituskuva etupuolelta. Kuvassa on esitetty yksikön eri osissa olevat komponentit. Ylimmässä osassa sijaitsee etukoje (T6W800) ja Smissline-johdonsuojakatkaisijat. Keskimmaisessä osassa on mahdollinen arvojen mittaus ja alimpaan osaan voidaan sijoittaa muita mittalaitteistoja.



**Kuva 30.** CPL-ohjelmistolla suunniteltu PDU-yksikön sijoituskuva etupuolelta.

Kuvasta 31 on esitetty PDU-yksikön kytkentäkuva. Etukojeena oleva kolminapainen T6 W 800 –kompaktikatkaisija on kytketty kuvan mukaisesti plusnapaan kahdella ja miinusnapaan yhdellä avausvälillä, jolloin koko PDU-yksikköön saadaan kolme avausväliä. Smissline johdonsuojakatkaisijoiden määrä riippuu niiden koosta (2–63 A). Smissline-johdonsuojakatkaisijat ovat kaksinapaisia, kuten kuvasta nähdään. Smisslinen jälkeen shunteilla on mahdollista suorittaa mittauksia esimerkiksi virran ja jännitteen

arvoista. Kun virran ja jännitteen arvot tiedetään, niin voidaan laskea esimerkiksi teho. Tämän hetkiset ABB:n käytössä olevat pienjännitemittalaitteistot toimivat vain vaihtojännitteellä, joten kyseiseen tasajännite PDU-yksikköön ei ole valmiina olevia mittalaitteistoja.



**Kuva 31.** Tasajännitteisen PDU-yksikön kytkentäkuva.

Kuvasta 32 on esitetty PDU<sup>pro</sup>-yksikön etukuva, missä lähtöinä toimivat Smisline-johdonsuojakatkaisijat on kytketty yksikön ylälaitaan. Johdonsuojakatkaisijoiden alapuolella on etukojeena T6W800-kompaktikatkaisija. Etukojeen alapuolelle on sijoitettu yksikön mittauslogiikat. Kuvan mukainen PDU<sup>pro</sup>-yksikkö on suunniteltu vaihtojännitekäyttöön, mutta PDU<sup>pro</sup>-yksikkö voidaan muuntaa tasajännitekäyttöön muutamilla yksinkertaisilla muunnoksilla. Kun PDU<sup>pro</sup>-yksikköä käytetään tasajännitteen jakelussa, niin 3-napaiset Smisline johdonsuojakatkaisijat muutetaan 2-napaisiksi ja pystykiskoja on käytössä kaksi (plus- ja miinuskiskot). Tasajännitteisen PDU-yksikön mittauslogiikan suunnittelua ei toteuteta tässä työssä, mutta periaatteessa tasajännitteiset virran ja jännitteen arvot saadaan mitattua esimerkiksi vaiheeseen kytkettävillä virran mittauskomponenteilla (Shunt). Virran mittauskomponentit sijoitetaan esimerkiksi plus vaihee-

seen, kuten kuvassa 31 on esitetty. Virran mittauskomponenteilta saatavat tasavirta-arvot täytyy ensin vaihtosuunnata ja muuntaa mittalaitteille sopivaksi arvoksi 4–20 mA, koska ABB:n käytössä olevat mittalaitteet eivät toimi vielä suoraan tasajännitteellä. Myöhemmin tämän työn jälkeen tasajännitteen mittaukseen on kuitenkin tulossa valmiit komponentit.



**Kuva 32.** PDU<sup>pro</sup>-yksikkö edestä.

Jos pääjännite mitoitetaan suuremmaksi kuin  $220\text{ V}_{\text{dc}}$ , niin työssä käytettävän PDU-yksikön tilalle suunnitellaan PDU-yksikkö joka on toteutettu kompaktikatkaisijoilla. Kompaktikatkaisijat kestävät suuremmat jännitteet kuin Smissline-johdonsuojakatkaisijat, mutta Smissline katkaisijoita käyttämällä saadaan PDU-yksikköön kytkettyä useampia kuormia kuin kompaktikatkaisijoilla.

Jos PDU-yksiköiden syöttövirta on suurin mahdollinen, jonka etukoje kestää, eli  $800\text{ A}$  ( $I_N = 630$ ), niin yhden PDU-yksikön lähtöjen maksimi määrä saavutetaan esimerkiksi  $20\text{ A}$  Smissline johdonsuojakatkaisijoilla.  $20\text{ A}$  johdonsuojakatkaisijoita käyttämällä saadaan yhteen PDU-yksikköön  $40$  lähtöä jolloin yksittäisen lähdön maksimiteho on

$$P_{\text{max/lähtö}} = 20\text{ A} \cdot 220\text{ V} = 4,4\text{ kW} \quad (18)$$

Suurin yksittäiselle kuormalle siirrettävä teho saadaan, kun käytössä on  $63\text{ A}$  virran Smissline-johdonsuojakatkaisija ja  $P_{\text{max}}$  saadaan laskettua kaavalla

$$P_{\text{max}} = 63\text{ A} \cdot 220\text{ V} = 13,86\text{ kW}, \quad (19)$$

jolloin  $63\text{ A}$  Smissline lähtöjä saadaan yhteen PDU-yksikköön kytkettyä

$$\frac{800\text{ A}}{63\text{ A}} = 12,69 = 12\text{ lähtöä}, \quad (20)$$

jolloin mitoitukseen jää ylimääräistä virtaa pienemmille lähdöille.

### 5.3 Kojeiston kiskostot

Kiskoston koon valinta riippuu kojeistoon syötettävän virran suuruudesta. Taulukossa 9 nähdään kojeiston kokoomakiskostojen ja latauskiskostojen koot eri virtaportaiden mukaan. Kiskomateriaalina käytetään kirkasta kuparikiskoa. Kiskoston koon valinnassa voidaan käyttää ( $2\text{ A}$  jokaista  $\text{mm}^2$  kohden) ohjesääntöä joka on todettu käytännössä ABB LVS -osaston koeistusten yhteydessä. Vaikka esimerkiksi  $2\,000\text{ A}$  virtaportaalalle valitun kokooma kiskoston kuormitus onkin suurempi kuin ( $2\text{ A}$  jokaista  $\text{mm}^2$  kohden)

ohjesääntö, se ei haittaa, koska kyseiset mittaukset on tehty vaihtojännitteellä. Kuparikiskot kestävät suurempia virtoja tasajännitteisenä kuin vaihtojännitteisenä, joten voidaan päätellä, että 2 000 A tasavirta ei kuormita liikaa 2 x 40 mm x 10 mm kokoisia kuparikiskoja.

Taulukossa 10 esitetyn latauskiskoston koko on jokaisella virran suuruudella 2 x 40 mm x 10 mm, koska yhteen akustoon tarvittava latausvirta on noin 45 A. Vaikka latauskiskostoon kytkettäisiin jopa 8 akustoa, niin latauskiskostolla oleva virta olisi maksimissaan

$$I_{lk} = I_{akusto} \cdot \text{akuston määrä} = 45 \cdot 8 = 360 \text{ A}, \quad (21)$$

missä  $I_{lk}$  on latauskiskoston virta,  $I_{akusto}$  on akustolle menevä virta. Latauskiskon virta jää suuressakin kojeistossa niin pieneksi, että 2 x 40 mm x 10 mm kokoinen kiskosto riittää.

**Taulukko 9.** MDB-yksikön kiskostojen koot eri virtaportailta.

Päävirta	(A)	2 000	3 200	5 000
Kokoomakiskosto	(mm)	2 x 40 x 10	4 x 40 x 10	4 x 60 x 10
Latauskiskosto	(mm)	2 x 40 x 10	2 x 40 x 10	2 x 40 x 10

#### 5.4 Kustannusten vaikutus suunnittelussa

Kojeiston suunnittelussa täytyy ottaa huomioon myös kustannukset. Teknisesti parhaiden vaihtoehtojen kustannukset nousevat usein korkeammiksi, kuin perusratkaisuilla toteutettu kojeisto. Käytön ja huollon kannalta helpoin vaihtoehto on käyttää katkaisijoina kasetti-mallia, jolloin vian tai huollon tarpeen sattuessa katkaisija on helppo vetää pois kojeistosta. W-kenttään kytkettävien kasettien kustannukset ovat samalla myös korkeimmat sekä kasetti-mallin että W-kentän yhteiskustannusten takia.

Edullisempaan ratkaisuun päästään, kun kojeistossa käytössä on F-kenttä ja katkaisijoina pikakiinnitettävä (Plug-in), tai ulosvedettävä (Withdrawable) malli. Edullisemmassa ratkaisussa joudutaan tekemään enemmän työtä vian tai huoltotöiden aikana, koska katkaisijoiden irrotus on monimutkaisempaa kuin kasettimallisten katkaisijoiden. Edullisemmasta hinnasta huolimatta kojeiston luotettavuus ja laatutekijät eivät kuitenkaan heikkene.

Kokoomakiskoston paikan valintaan kojeistossa vaikuttaa katkaisijoiden asennuskorkeudet. Kun pääkokoomakiskosto sijoitetaan pääkatkaisijaan nähden mahdollisimman lähelle, niin katkaisijan ja kokoomakiskoston välille kytkettävät kuparilaatat ovat kooltaan pienempiä, jolloin saavutetaan säästöjä myös vähemmällä kuparin määrällä.

### 5.5 PDU-yksiköiden mitoitus eri virtaportaille

Tasajännitteinen sähköjakoelukojeisto täytyy olla valmiiksi mitoitettuna useille eri virtaportaille, jotta asiakkaille on valmiina useampi eri vaihtoehto. Taulukosta 10 nähdään kolme eri virtaporrasta ja niiden mukaan mitoitettut jännitteet, nimellisvirrat, käyttövirrat IP 31-koteloinnilla, 0,5 s oikosulkuvirrat, akustot ja PDU-yksiköiden määrät.

Tasajännitteistä sähköjakoelukojeiston pienimmän virtaportaan ( $I_N = 2\,000\text{ A}$ ) mukaista ratkaisua voidaan käyttää esimerkiksi pienissä ATK-keskuksissa. Pienin virtaporras sopii pieneen konesaliin, koska esimerkikiratkaisussa on kaksi PDU-yksikköä, jolloin yhdeltä PDU-yksiköltä saadaan maksimissaan 40 lähtöä servereille. PDU-yksikön lähtöjen määrä riippuu MDB-yksiköltä PDU:lle syötettävästä virrasta ja kuormien suuruudesta. Pienimmällä virtaportaalla saadaan siis maksimissaan yhteensä 80 lähtöä kuormille. Suurimmalla virtaportaalla ( $I_N = 5\,000\text{ A}$ ) saadaan esimerkkilaskelman mukaan syötettyä kahdeksaa PDU-yksikköä, jolloin esimerkiksi suurta ATK-keskusta voidaan syöttää jopa 320 lähdöllä. Jos käytössä on 8 PDU-yksikköä, täytyy ottaa huomioon, että yhden PDU-yksikön maksimi virta on



$$I_{PDU} = \frac{I_{IP31}}{PDU - \text{yksiköiden määrä}} = \frac{3\,800\,A}{8} = 475\,A, \quad (22)$$

jolloin asiakkaan täytyy tietää, että PDU-yksiköiden yhteiskuormitus  $I_{IP31}$  on maksimissaan 3 800 A. Koska yhden PDU-yksikön maksimivirta on 630 A, niin kuormitusta voidaan jakaa eri PDU-yksiköille tarvittavasta virrasta riippuen. Taulukossa 10 on laskettu esimerkit jokaiselle virtaportaalille ja PDU-yksikön maksimivirrat kyseisissä esimerkeissä. Taulukossa on nähtävillä PDU-yksikön nimellisvirta  $I_N$  ja todellinen virta  $I$ .

**Taulukko 10.** PDU-yksikön esimerkkiratkaisuja.

PDU (Esimerkki ratkaisuja)		E2N2000DC	E4H3200DC	E6H5000DC
PDU- yksiköiden määrä	(kpl)	2	4	8
$I_{PDU} \ I_N / I$	(A)	800 / 750	800 / 600	800 / 475
$U_{PDU}$	(V)	220	220	220

## 5.6 Akusto

Akustolta purkautuvan virran suuruuteen vaikuttaa PDU-yksikköön kytkettyjen kuormien virran tarve. Tässä työssä esimerkkilaskentojen mukaan akkujen purkautuessa kuormille tarvitaan maksimissaan 630 A virta. Jos käytetään esimerkiksi 120 Ah akkuja, niin saadaan laskettua kuinka kauan UPS-järjestelmä ylläpitää kuormille tarvittavaa virtaa. Akkujen purkausaika saadaan laskettua

$$\frac{I_{akku}}{I} = \frac{120\,Ah}{630\,A} = 0,19\,h \cdot 60\,min = 11,42\,min = 11\,min\,25\,s, \quad (6)$$

missä  $I$  on kuormille tarvittava virta ja  $I_{akku}$  on yhden akun koko. Kyseiset laskelmat ovat teoreettisia ja eri akkuteknologioiden virran kestot voivat vaihdella akkumallin

mukaan. Paras tapa akun suurimman virrankestoisuuden selvittämiseen on ottaa yhteyttä akkuvalmistajaan.

Taulukosta 11 nähdään esimerkki C&D Technologies -yhtiön valmistaman Liberty Series 12 V 100 Ah -akun suurimmista purkausvirroista eri purkausajoilla riippuen yhden kennon loppujännitteestä. Purkausvirran suuruus riippuu siitä kuinka tyhjäksi akun kennot puretaan, kuten taulukon loppujännitteiden arvosta nähdään. Tässä työssä akuilta tarvittava (maksimissaan) 630 A purkausvirta saadaan toteutettua esimerkiksi 10 min ajalle, kun kytketään kolme akkuriviä rinnan jolloin purkautuva jännite on taulukosta katsotuilla arvoilla

$$I_{10 \text{ min purku}} = 3 \cdot 213 \text{ A} = 639 \text{ A}, \quad (7)$$

jolloin yhden akkukennon loppujännitteen arvoksi tulee 1,80 V. Kun akkukennoa ei pureta aivan tyhjäksi, niin akun uudelleenlataus on nopeampaa. LS 12 100 -akun pikalatausjännite on 13,98 V, jolloin yhdessä akkurivissä on

$$\frac{220 \text{ VDC}}{13,98 \text{ VDC}} = 15,7 = 16 \text{ akkua}, \quad (8)$$

missä luku pyöristetään suurempaan, koska 15 akulla latausjännite nousisi liian suureksi. Akuston kokoa määritettäessä täytyy ottaa huomioon, että ladattava jännite on suurempi kuin akuilta purkautuva jännite. Mikäli akkuja on 16 kappaletta sarjassa, niin akuilta kuormille purkautuva jännite on

$$U_N = 16 \cdot 12 \text{ V} = 192 \text{ V}, \quad (9)$$

jolloin akuilta kuormille purkautuva jännite ei vastaa pääjännitettä  $U_N$ , joka on esimerkiksi tässä työssä 220 V. Akuston kokoa ja latausjännitettä määritettäessä täytyy akuston latausjännitteen olla suurempi kuin pääjännitteen  $U_N$ . Oikea akuston koko ja latausjännitteen määrä saadaan, kun lasketaan ensin tarvittava akkujen määrä, jotta purkautuva jännite on pääjännitettä vastaava. Oikeaksi akkujen määräksi saadaan

$$\text{akkujen määrä} = \frac{220}{12} V = 18,33 = 18 \text{ kpl}, \quad (10)$$

missä akkujen määrä voidaan pyöristää alaspäin, koska 18 akusta purkautuva jännite on

$$U_{\text{purku}} = 18 \cdot 12 V = 216 V, \quad (11)$$

ja  $U_{\text{purku}}$  on tarvittavan lähellä pääjännitteen  $U_N$  arvoa. Yhdelle PDU-yksikölle tarvittavassa akustossa on siis

$$18 \text{ akkua} \cdot 3 \text{ akustoa rinnakkain} = 54 \text{ akkua}, \quad (12)$$

jolloin esimerkiksi 4 000 A kojeistossa on

$$5 \cdot 54 \text{ akkua} = 270 \text{ akkua}, \quad (13)$$

kun käytössä on LS 12 100 -akkumalli. Ladattaessa LS 12 100 -akkua, täytyy ottaa huomioon, että suurin mahdollinen latausvirta on 25 A jokaista 100 Ah kohden. Eli kyseistä LS 12 100 -akkua ladatessa pikalatausjännite  $U_{\text{pika}} = 2,33 V$  kennoa kohden, nimellislatausjännite  $U_N = 2,26 V$  kennoa kohden ja suurin latausvirta  $I_{\text{max}} = 25 A$ . (C&D Technologies, Inc. 2011.)

**Taulukko 11.** LS 12 100 -akun purkausvirrat kennon loppujännitteestä ja purkausajasta riippuen (C&D Technologies, Inc. 2011).

Kennon loppujännite (V)	Purkausvirta (A)				
	1 min	5 min	10 min	15 min	30 min
1,95	123,2	115,1	104,8	94,6	70,0
1,90	187,5	169,4	147,0	126,8	87,4
1,88	216,1	191,0	161,5	137,0	93,0
1,85	258,6	224,2	183,5	151,9	101,5
1,84	272,7	233,9	189,3	155,8	103,2
1,80	329,4	272,4	213,0	171,7	110,1
1,78	358,4	284,2	218,2	175,3	112,0
1,75	401,7	302,2	225,4	180,3	115,1

Laskelmissa käytetyn akkumallin (LS 12 100) mukaan suunnitellut akustot kasvavat tasajännitteisen sähköjakelukojeiston virtaportaiden mukaan, jolloin pienimmässä akustossa on 108 akkua ja suurimmassa jopa 432 akkua. Kaikissa esimerkeissä on käytetty 3 rinnankytkettyä akkusarjaa, mutta asiakkaan tarpeen mukaan akustoa voidaan silti joko kasvattaa, tai pienentää. Jos asiakas haluaa säästää esimerkiksi UPS-yksikön kuluissa, niin rinnankytkettyjä akkusarjoja voidaan 8 PDU-yksikön esimerkissä käyttää 2 jokaisessa akustossa, jolloin akuston toiminta-aika putoaa 5 minuuttiin.

Akuston keston vaikuttaa myös akkukennon loppujännitteen arvo. Jos akusto on käytössä pitempään vian aikana, niin kennon loppujännite on pienempi ja akuston uudelleen latauksessa kestää kauemmin. Taulukossa 12 nähdään eri virtaportaiden akustojen määrä, kun käytetään esimerkkilaskelmien PDU-yksiköiden määriä. MDB-yksikköön kytkettävien akustojen määrä riippuu kojeistossa olevien PDU-yksiköiden määrästä. Jokaiselle PDU-yksikölle tarvitaan oma akusto.

**Taulukko 12.** Akustojen koko.

<b>Pääkatkaisija</b>		<b>E2N2000DC</b>	<b>E4H3200DC</b>	<b>E6H5000DC</b>
PDU-yksiköiden määrä	(kpl)	2	4	8
MDB-yksikköön kytkettävä akuston määrä	(kpl)	2	4	8
Akkuja sarjassa	(kpl)	18	18	18
Rinnan kytketyt akkuryhmät/ akusto	(kpl)	3	3	3

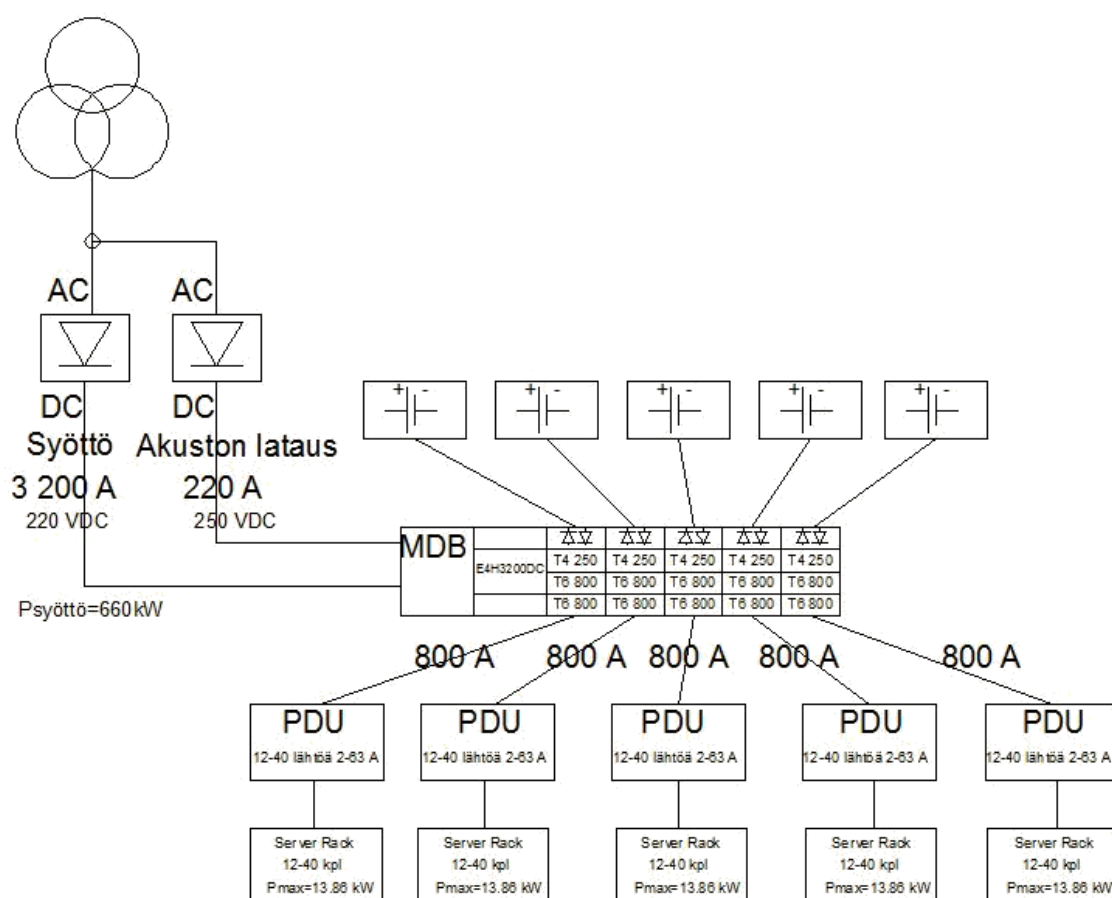
## 6 YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli kehittää pientasajännitteisille kuormille sopiva sähkönjakelu-kojeisto. Tarkoituksena oli saavuttaa parempi sähkön laatu esimerkiksi tasajännitettä käyttävissä ATK-keskuksissa vähentämällä tasa- ja vaihtosuuntauksissa tarvittavien komponenttien määrää. Sähkön laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa siirrossa ja muunnoksissa tapahtuvat häviöt. Kun sähkö jaetaan kuormille valmiiksi tasajännitteisenä, niin häviöt pienenevät joka näkyy myös kuluttajan sähkön laadussa. Kustannuksiin vaikuttavat myös pienet asiat, kuten kojeistoon käytettävä kuparin määrä. Tasajännitteisenä voidaan siirtää suurempia virtoja kuin vaihtojännitteellä, jolloin kojeistossa tarvittava kuparin määrä on suhteessa pienempi kuin vaihtojännitteisillä virroilla. Tasajännitteisellä jakeluverkolla saadaan teollisuudessa hyödynnettyä myös verkkoon tuotettavaa tehoa. Jarruttava moottori voi tuottaa tehoa takaisin verkkoon, jolloin kiihdyttävät ja toiminnassa olevat moottorit voivat käyttää verkkoon päin tuotettua tehoa.

Suunniteltu tasajännitteinen sähkönjakelu-kojeisto soveltuu myös käyttötarkoituksiin joissa on sekä vaihto- että tasajännitteisiä kuormia ja moottorilähtöjä. Moottorilähdöt eroavat normaaleista lähdöistä siten, että ne tarvitsevat moottorinsuojakatkaisijan ja moottorin ohjaukseen esimerkiksi taajuusmuuttajan. Tässä työssä suunnitellun tasajännitteisen sähkönjakelu-kojeiston pää rakenne soveltuu esimerkiksi ATK-keskusten, tasajännitteisten asuinalueiden, teollisuuden ja laivojen sähköistyksen tarpeisiin. Valmiiseen kojeistoon voidaan tehdä muutoksia käyttökohteiden ja asiakkaiden tarpeiden mukaan. Tasajännitteisen sähkönjakelu-kojeiston katkaisijoiden suuruudet ja lähtökenttien määrät suunnitellaan käyttökohteen tarpeiden mukaan, jolloin kojeiston soveltuu sekä pienten että suurten kuormien sähkönjakeluun.

Kuvassa 33 nähdään koko sähkönjakelujärjestelmän esimerkkirakenne jakeluverkon muuntajalta lähtien. Jakeluverkon muuntaja laskee keskijännitteen pienjännitteeksi. Jakeluverkon muuntajan jälkeen vaihtojännite tasasuunnataan sähkönjakelu-kojeiston syöttökiskoilta ja latauskiskoilta sopiviksi jännitteen ja virran arvoiksi. Jakeluverkon puolella olevien tasasuuntaajien ominaisuudet (ohjattava, ohjaamaton) riippuvat jakeluverkosta eivätkä vaikuta tasajännitteisen sähkönjakelu-kojeiston suunnitteluun. Esimerkkira-

kenteessa MDB-yksikön pääkatkaisijana on 3 200 A suuruinen Emax EH43200 -mallinen ilmakatkaisija, joka syöttää päävirran lähtökenttien katkaisijoiden kautta PDU-yksiköille. MDB-yksikössä on viisi lähtökenttää. Jokaiseen lähtökenttään on kytketty akusto joka syöttää PDU-yksikköä sähkökatkoksen sattuessa. Kuvasta nähdään PDU-yksikön lähtöjen määrät, yhden lähdön virran suuruudet ja kuinka monelle palvelimelle yhdestä PDU-yksiköstä on mahdollista syöttää virtaa. Kuvan esimerkkiratkaisussa voidaan syöttää maksimissaan 200 palvelinta, riippuen palvelinten suuruudesta.



**Kuva 33.** Koko sähköjakelujärjestelmä jakeluverkon muuntajalta kuormille saakka.

Taulukossa 13 on esitetty tasajännitteinen jakelukojeisto kolmella eri syöttövirran  $I_N$  arvolla (2 000 A, 3 200 A ja 5 000 A). Taulukko on yhteenvetona tasajännitteisen sähköjakelukojeiston suunnittelun tuloksista. Taulukossa on määritetty MDB-yksikön ni-

mellisvirran ja -jännitteen arvot sekä 0,5 sekunnin oikosulkuvirran arvo. Taulukossa on määritetyt MDB-yksiköiden kokoomakiskoston koot, joiden valintaan vaikuttavat kojeiston virransuuruus. Latauskiskostojen koot ovat kaikissa virtaportaisissa yhtä suuret, kuten taulukosta 13 nähdään, koska akuston latausvirta on niin pieni, ettei 2 x 40 mm x 10 mm suurempia kiskostoja tarvita edes kahdeksan akuston kojeistossa. PDU-yksiköiden määrät ovat esimerkkilaskelmien mukaisia ja voivat vaihdella kuormien määrän ja tehontarpeen mukaan. Taulukossa on esitetty myös akustojen koot jokaiselle virtaportaalalle ja akuston latausvirrat ja -jännitteet sekä UPS-yksikön toiminta-ajat. Kuten taulukosta nähdään, UPS-yksikön toiminta aika on lyhyt, mahdollistaen muiden varajärjestelmien kytkemisen päälle.

Suunnitellusta sähkönjakelukojeistosta valmistetaan myös prototyyppi. Tarkoituksena on saada prototyyppi koestettua, jotta kojeistosta saataisiin myyntiin soveltuva ratkaisu. Tasajännitteisen sähkönjakelukojeiston prototyypin valmistus toteutetaan ABB LVS-osastolla tämän diplomityön valmistumisen jälkeen.



**Taulukko 13.** Tasajännitteisen sähkönjakelujojeiston ominaisarvot.

<b>MDB</b>				
<b>Pääkatkaisija</b>		<b>E2N2000DC</b>	<b>E4H3200DC</b>	<b>E6H5000DC</b>
$I_N$	(A)	2 000	3 200	5 000
$U_N$	(V)	220	220	220
$I_{IP31}$	(A)	1 500	3 000	3 800
$I_{cw}$ (0,5 s)	(kA)	40	65	65
<b>MDB-yksikön kiskostot</b>				
Kokoomakiskosto	(mm)	2 x 40 x 10	4 x 40 x 10	4 x 60 x 10
Latauskiskosto	(mm)	2 x 40 x 10	2 x 20 x 10	2 x 20 x 10
<b>PDU (Esimerkki ratkaisuja)</b>				
PDU-yksiköiden määrä	(kpl)	2	4	8
$I_{PDU}$ ( $I_N / I$ )	(A)	800 / 750	800 / 600	800 / 475
$U_{PDU}$	(V)	220	220	220
<b>AKUT</b>				
MDB-yksikköön kytkettävä akuston määrä	(kpl)	2	4	8
Akkuja sarjassa	(kpl)	18	18	18
Rinnan kytketyt akkuryhmät/ akusto	(kpl)	3	3	3
Akkujen määrä	(kpl)	108	216	432
$I_{lataus}$	(A)	90	180	360
$U_{lataus}$	(V)	250	250	250
Akuston kesto/PDU	(min)	10	10–15	10–15

## LÄHDELUETTELO

ABB. (2000). *Teknisiä tietoja ja taulukoita*. Vaasa. 9. painos. 626 s. ISBN 951-99366-0-2.

ABB (2010). *Technical catalogue-Edition 2010: Tmax. T Generation Low voltage moulded-case circuit-breakers up to 1 600 A*. [Tekninen esite]. 418 s.

ABB. (2011a). Air Circuit Breakers-Emax. [Verkkajulkaisu]. [Siteerattu 28.11.2011]. Saatavissa: Url:< <http://www.abb.com/product/seitp329/5334e822fc78a488c1256ffe00484353.aspx>>

ABB. (2011b). *Kompaktikatkaisijat-tuotesarjat*. [Verkkajulkaisu]. [Siteerattu 13.12.2011]. Saatavissa: URL:< <http://www.abb.fi/product/seitp329/c9fb21b8a47b6cf3c1256ffe0048c46e.aspx?tabKey=2>>

ABB Low Voltage Products. (2011). *Technical Catalogue: Smissline Electrical protective devices in a system*. [Tekninen esite]. ABB Switzerland Ltd. 102 s.

ABB Sace. (2011). *ABB SACE Emax DC: Low Voltage Air Circuit Breakers for Direct Current Applications*. [Tekninen esite]. 100. Saatavissa: Url:< [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/297dcb6f49ac0ecbc12576d4005b5b32/\\$file/1sdc200012d0202.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/297dcb6f49ac0ecbc12576d4005b5b32/$file/1sdc200012d0202.pdf)>

Alanen, Raili & Toni Kylkisalo. (2007). *Tasajännite taajaman sähkönjakelussa ja mikroverkoissa*. [Raportti]. Espoo: VTT. 139 s.

American Power Conversion. (2003). *Battery Technology for Data Centers and Network Rooms: VRLA Reliability and Safety*. [Internet]. [Siteerattu: 2.2.2012]. Saatavissa: Url:< <http://www.apcdistributors.com/white-papers/Power/WP-39%20Battery%20Technologies%20for%20Data%20Centers%20and%20Network%20Rooms%20-%20VRLA%20Reliability%20and%20Safety.pdf>>

- C&D Technologies, Inc. (2011). *Liberty series 1000. Valve Regulated Lead-Calsium Battery for Standby Applications*. [Internet]. [Siteerattu: 8.2.2012]. Saatavissa: Url:<  
[http://www.cdstandbypower.com/product/battery/vrla/pdf/12\\_373.pdf](http://www.cdstandbypower.com/product/battery/vrla/pdf/12_373.pdf).>
- Gab-Su, Seo, Jongbok Baek, Kyusik Choi, Hyunsu Bae & Bohyung Cho. (2011). Modeling and analysis of DC distribution systems. *IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), The Shilla Jeju, Korea*. 223–227.
- Hammerstrom, D.J. (2007). AC Versus DC Distribution Systems Did We Get it Right? *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. 1-5. 24–28
- Hiekka, Toni. (2011). *Tasajännitteen käyttö sähköjakelussa*. Kandidaatintyö. Vaasan yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. 38 s.
- Kaipia, Tero, Pasi Peltoniemi, Jukka Lassila, Pasi Salonen & Jarmo Partanen. (2009). Impact of Low Voltage DC System on Reliability of Electricity Distribution. *20<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution*. LUT.
- Liukkonen, Matti. (2008). *Hybridityökoneen tehoelektroniikkakomponenttien toiminnallinen simulointi*. Diplomityö. TKK. Tehoelektroniikan suunta. 96 s.
- Mäkitalo, Ilkka. (2008). *Tasasähköjaku ja kiinteistöjen tasasähköverkot*. Kandidaatin-työ. LTY. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Sähkötekniikan osasto. 40 s.
- Nuutinen, Pasi, Pasi Salonen, Pasi Peltoniemi & Pertti Silventoinen. (2008). *Customer-End Inverter in a LVDC Distribution Network*. [Verkkojulkaisu]. Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics. [Viitattu: 15.11.2011] Saatavilla: <  
<http://lib.tkk.fi/conf/2008/urn011590.pdf>.>
- Niiranen, Jouko. (2007). *Tehoelektroniikan komponentit*. Helsinki: Hakapaino Oy. 4.painos. 234 s. ISBN 978-951-672-317-7.

- Partanen, Jarmo, Juha Pyrhönen, Pertti Silventoinen, Markku Niemelä, Tuomo Lindh, Tero Kaipia, Pasi Salonen, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi & Jukka Lassila. (2007). *Tasasähköjakelujärjestelmän toiminnalliset kriteerit ja sähköturvallisuustarkastelu*. [Raportti]. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan osasto. 81 s.
- Partanen, Jarmo. (2008). *Tehoelektroniikka sähköjakelussa: Hankeosio 1/2*. [Tutkimusraportti]. LTY. Sähkötekniikan koulutusohjelma. 110 s.
- Partanen, Jarmo. (2010). *Tehoelektroniikka sähköjakelussa – Pienjännitteinen tasasähköjakelu*. [Tutkimusraportti]. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. 170 s. ISBN 978-952-214-981-7.
- Rajagopalan, Satish, Brian Fortenbery & Dennis Symanski. (2010). Power quality disturbances within DC data centers. *INTELEC 32nd International Telecommunications Energy Conference*. 1-7.
- Rekola, Jenni. (2009). *Kolmitasoiset suuntaajat tasasähköjakelussa*. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. 82 s.
- Ripatti, Samuli. (2011). *Muunnossähköauton akuston suunnittelu*. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. 35 s.
- Salomonsson, Daniel & Ambra Sannino. (2007). Low-Voltage DC Distribution System for Commercial Power Systems With Sensitive Electronic Loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 22:3. 1620–1627.
- Salonen, Pasi. (2006). *Tasasähkön hyödyntämismahdollisuudet sähköjakelussa*. Diplomityö. LTY. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Sähkötekniikan osasto. 86 s.
- Semikron. (2011). *Semipack complete Data Sheet*. [Sähköinen julkaisu]. [Siteerattu 22.3.2012]. Saatavilla: URL:<[http://www.semikron.com/skcompub/en/SID-21340CF6-52350772/semipack\\_complete\\_data\\_sheet.pdf](http://www.semikron.com/skcompub/en/SID-21340CF6-52350772/semipack_complete_data_sheet.pdf)>

Silvonen Kimmo. (2004). *Sähkötekniikka ja elektroniikka*. Helsinki: Otatieto. 2.painos. 511 s. ISBN 951-672-342-X.

Voutilainen, Vesa. (2007). *Tasasähköjakelelun käyttöpotentialin määrittäminen*. Diplomityö. LTY. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Sähkötekniikan osasto. 117 s.

Ylinen, Marko. (2010). *UPS suunnittelu ja mitoitus, UPS-laskentaohjelma*. SAMK. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. 113 s.